

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE AGRONOMIA



UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA ESTIMAR LA DINAMICA DE UNA
POBLACIÓN IDEAL DE *Eisenia foetida* (Lombriz de Tierra, Roja Californiana)

Por:

FIDEL MAXIMIANO PEÑA RAMOS

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:
INGENIERO EN AGROBIOLOGIA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2004

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA ESTIMAR LA DINAMICA DE UNA
POBLACIÓN IDEAL DE *Eisenia foetida* (Lombriz de Tierra, Roja Californiana)

TESIS POR:

FIDEL MAXIMIANO PEÑA RAMOS

Esta Tesis fue realizada bajo la dirección del comité particular de asesoría, ha sido aprobada por el mismo y aceptada con requisito parcial para obtener el grado de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGIA
COMITÉ PARTICULAR

ASESOR PRINCIPAL _____ -

Dr. José Fco. Rodríguez Martínez

ASESOR _____

BIOL. Sofía Comparan Sánchez

ASESOR _____

M.C Adolfo Ortegón Pérez

ASESOR _____

BIOL. Sergio Pérez Mata

M.C. Arnoldo Oyervides García
Coordinador de la División de Agronomía

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Junio de 2004

La verdad aparece a partir del error mas fácilmente que a partir de la confusión

Francis Baco (1561-1626)

No hay nada tan practico como una buena teoría

Emanuel Kant (1724-1804)

Lo peor que le puede pasar al hombre, estar convencido de una fuerza divina.

No es suficiente poseer una buena mente, lo principal es saber usarla

GRADECIMIENTOS

Al M. C. Jesús Ricardo Canales Ramos, por haberme llevado al Maravilloso Mundo de la Matemática, por su nobleza y Sencillez.

AL Dr. José Francisco Rodríguez Martínez por:

- Su constante insistencia de una formación sistémica en los procesos biológicos.
- Haberme formado con una visión eficientemente holística.
- Hacerme ver que los fenómenos requieren de explicación científica y no de aceptaciones desconocidas.

A Claudia Gabriela Godina por ser una mujer que sabe salir adelante ante la vida

A mis Padres y hermanos por su invaluable apoyo para la realización de esta tesis.

A los amigos que siempre estuvieron compartiendo su forma de pensar.

GRACIAS

INDICE DE CONTENIDO

	Pagina
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCION	
1	
Objetivos	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Importancia de la Lombricultura en el Mundo y en México	3
Clasificación Taxonómica de <i>Eisenia foetida</i> .	3
Clase Polichaeta	4
Clase Hirudíneas (Sanguijuelas)	
4	
Clase Oligochaeta	
4	
Hábitos Alimenticios	
5	
Hábitos Reproductivos	
5	
Ciclo de Vida	
6	
Estadío de Cocon	
6	
Estadío Juvenil	
7	
Estadío SubAdulto	
7	
Estadío Adulto	
7	
Factores Limitantes para su Reproducción	8
Temperatura	8

	Luz	9
	PH	9
	Humedad	10
	Alimentación	10
	Enfoque Sistémico	11
	Análisis de Sistemas Y Simulación	11
	Sistema	12
	Simulación	12
	Dinámica Poblacional	13
	Conceptos Poblacionales	
13		
	Fecundidad y Natalidad	
13		
	Supervivencia, Mortalidad y Promedio de Sobrevivientes	14
	Índice de reproducción medio	15
	MATERIALES Y METODOS	16
	Descripción del modelo	16
	Etapas de creación del modelo	17
	Etapa I	17
	Etapa II	18
	Etapa III	23
	Diagrama de Simulación	24
	Diagrama Simbólico del Modelo	26
	El Modelo	27
	Cocones	28
	Juveniles	28
	SubAdultos	28
	Adultos	28
	Fecundidad	30
	Natalidad	30

	Mortalidad	32
	Estadío Juveniles	
35		
	Estadío de SubAdultos	36
	Estadío de Adultos	36
	Estadíos Representados por Simbologías Ecológicas	37
	Cocon	37
	Juvenil	38
	SubAdulto	38
	Adulto	38
	Fracción Poblacional	39
	Resumen Matemático del Modelo	39
	Manejo del Modelo	
41		
	Primera Corrida	41
	Segunda Corrida	42
	RESULTADOS	43
	Resultados del Estadío de Cocon	43
	Primera Corrida	43
	Resultados del Estadío Juvenil	47
	Primera Corrida	47
	Resultados del Estadío SubAdulto	51
	Primera Corrida	51
	Resultados del Estadío Adulto	53
	Primera Corrida	53
	Fracción de Población (primera corrida)	55
	Resultados de la Segunda Corrida	57
	Estadío de Cocon	57
	Efecto de la Mortalidad en el Estadío Cocon (Probabilidades)	61
	Estadío Juvenil	68
	Segunda Corrida	68

Tasas de Mortalidad en la Estructura de Edades Poblacionales de Juveniles (Probabilidades), según el Modelo Construido	76
Tasas de Sobrevivientes en la Estructura de Edades Poblacionales de Juveniles (Probabilidades), según el Modelo Construido	78
Estadío de SubAdultos	81
Segunda Corrida	81
Estadío de Adulto	86
Segunda Corrida	86
Fracción Poblacional	89
Segunda Corrida	89
DISCUSIÓN	92
Población Ideal	92
Estadío de Cocon	92
Estadío Juvenil, Subadulto y Adulto	92
CONCLUSIONES	94
LITERATURA CITADA	95
APENDICE I	99
APENDICE II	
103	
APENDICE III	
107	

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pagina
1	Aumento de la población de un lecho(2 x 1 m) en el periodo de un año con una r de 2 recién nacidos por lombriz (Ferruzzi, 2001). Apendice2	18
2	Aumento de la población en forma acumulativa durante las 0 – 13 semanas, representada por simbologías ecológicas tales como L_o y r. Apéndice 1	100
3	Similarmente al cuadro 2, con la diferencia de la acumulación de la población de 14 a 26 semanas	100
		101

4	Aumento de la población durante las 27 – 39 semanas representadas simbólicamente por L_0 y r .	
5	Incremento de la población comprendidas en el rango de 40 – 52 semanas, representadas por L_0 y r .	102
6	Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 3 recién nacidos por lombriz.	104
7	Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 9 recién nacidos por lombriz.	105
8	Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 15 recién nacidos por lombriz.	105
9	Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 21 recién nacidos por lombriz.	106
10	Estimación total de la población de lombriz de <i>Eisenia foetida</i> con base en la solución analítica desglosada con “n” bloques.	24
11	Probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1977).	24
12	Aumento de la población en el estadio de cocon (con base en el modelo utilizado), así como también la población presente en cada una de las categorías durante las 52 semanas. Este aumento poblacional esta parametrizada por las condiciones de la primera corrida.	24

13	Aumento de la población de lombrices de acuerdo al estadio juvenil con sus respectivas categorías de RecienN, juveniles1, juveniles2, juveniles3 y juveniles4. Datos del el modelo construido.	48
14	Aumento de la población de lombrices en el estadio subadulto con sus respectivas categorías de subadulti1, subadulto2, subadulto3 y subadulto4. Datos del el modelo construido.	51
15	Aumento de la población de cocones según el modelo construido y con base en las probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1978).	58
16	Razones de mortalidad en cada una de las categorías del estadio de cocon con base en las probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.	64
17	Aumento de las tasas de poblaciones cocones sobrevivientes en cada uno de los intervalos de las categorías que conforman a este estadio (cocon).	66
18	Aumento poblacional de <i>Eisenia foetida</i> en el estadio de lombrices (edades juveniles) con base en las probabilidades de supervivencia, según el modelo construido.	74
19	Presenta las tasas de mortalidad en cada una de las categorías que comprenden al estadio de juvenil.	76

		12
20	Razones de cambio de individuos sobrevivientes que presentan cada una de las categorías de las poblaciones del estadio juvenil de acuerdo con las probabilidades de supervivencias de 0.7, 0.8, 0.9, 0.9 y 0.91 durante las 54 semanas simuladas.	78
21	Aumento poblacional de lombrices de 6 – 9 semanas de edad comprendidas en el estadio de subadultos, según el modelo construido.	84

INDICE DE FIGURAS

Figura		Pagina
1	Estructura de edades para el modelo de la especie <i>Eisenia foetida</i> .	25
2	Diagrama conceptual simbólico del modelo de simulación (<u><i>Eisenia foetida</i></u>).	26
3	Diagrama conceptual del modelo dinámico de simulación para la lombriz <i>Eisenia foetida</i> .	27
4	Representación Esquemático del ciclo de vida de <i>Eisenia foetida</i> (Modelo de simulación).	29
5	Aumento de una población ideal de cocones durante 52 semanas (Según el modelo construido).	46
6		50

	Aumento de una población ideal de lombrices según el modelo construido durante 52 semanas.	
7	Aumento de la población ideal total de las edades juveniles con sus respectivos 4 desplazamientos.	50
8	Aumento poblacional de lombrices adultas (13 semanas de edad), según el modelo construido.	53
9	Crecimiento exponencial de las poblaciones, en la estructura de edad tanto de cocones como de lombrices.	54
10	Fracción población en la estructura de edades de la especie <i>Eisenia foetida</i> .	56
11	Aumento de la población de cocones con base en el modelo construido e incluyendo las probabilidades de supervivencias publicadas por Edwards y Lofty (1978), para cada una de las categorías que comprende el estadio.	60
12	Aumento de las razones de mortalidad en las poblaciones de cocones en <i>Eisenia foetida</i> .	65
13	Aumento de la población de cocones sobrevivientes de <i>Eisenia foetida</i> según el modelo construido.	67
14	Crecimiento exponencial de poblaciones de lombrices de edades juveniles, con probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.	75

15	Crecimiento exponencial de las tasas de mortalidad en cada una de las categorías que comprenden a las edades juveniles de acuerdo a las probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.	78
16	Crecimiento poblacional de las tasas de sobrevivientes, con base en las probabilidades de supervivencia, según el modelo construido.	80
17	Crecimiento exponencial de lombrices subadultas, de acuerdo a la probabilidad de supervivencia de 0.9, según el modelo construido.	85
18	Crecimiento poblacional de lombrices (<i>Eisenia foetida</i>) maduras sexualmente, según el modelo construido.	87
19	Presenta a las poblaciones totales de los estadios de cocon, juvenil, subadulto y adulto respectivamente.	88
20	Fracción poblacional de <i>Eisenia foetida</i> con base en las probabilidades, según el modelo construido.	89
21	Crecimiento exponencial de lombrices recién nacidas de <i>Eisenia foetida</i> , tanto predichos como observados (datos empíricos, Ferruzzi 1999).	20

INTRODUCCIÓN

Los estudios de predicción de eventos futuros se han aplicado en áreas tales como economía, mercadotecnia, bolsa de valores, predicción del tiempo atmosférico (Frere,1987) y en las ciencias sociales para conocer su comportamiento a través del tiempo. Similarmente en la ciencia ecológica y en particular en ecología de poblaciones se necesita predecir variables tales como tamaño de población, especies raras, en peligro de extinción y reproducción (Ebert, 1998). El tener predicciones acertadas de algunas de estas variables nos ayuda a tomar mejores decisiones para conservar las especies con bajas tasas de reproducción, explotación racional de la flora y fauna silvestre (Grant et al., 1997) así como también conocer anticipadamente los distintos ciclos de vida que presentan las especies (Ebert,1998).

Para este fin se han empleado diversas formas y métodos tales como análisis de fotografía aéreas (sensores remotos, digitales entre otras) y análisis estadístico (Pielou, 1975). Sin embargo, los usos de estos métodos tienen sus propias limitaciones debido a la forma en que se emplean, lo que significa que únicamente analizan las situaciones de manera aislada o en partes. De aquí que es necesario buscar nuevos métodos que sean capaces de estudiar las situaciones o fenómenos en forma holística (Capra, 1996) así como también que incluyan en su sistemas de predicción relaciones complejas entre variables(Carrillo, 2000). La alternativa es emplear un enfoque sistémico ya que este aborda los estudios desde un punto de vista totalizador de los fenómenos (Capra,1996). Es decir aquellos donde su forma de expresión no es única (1:1), como es el caso del comportamiento poblacional lombrícola. Las poblaciones de lombrices presentan diferentes tendencias ecológicas: supervivencia, mortalidad, fecundidad, natalidad, esperanza de vida tasa intraespecifica de crecimiento (Ebert, 1998; Pianka, 1978; Emmel, 1976). De esta manera los fenómenos ecológicos de la lombriz no pueden ser siempre lineal debido a los diferentes tipos de manejo y a la constante interacción que tienen con el ambiente, por lo tanto los

fenómenos ecológicos no son lineales. Así, aplicando el enfoque sistémico se puede crear un modelo de simulación para estimar la dinámica de una población ideal de *Eisenia foetida* para conocer anticipadamente su comportamiento poblacional, así como también los eventos catastróficos que pueden presentarse en la población. De esta manera el modelo es un método de predicción para mejorar las estimaciones de las poblaciones de la lombriz *Eisenia foetida*. Entonces aplicando un modelo de simulación para estimar la dinámica poblacional nos ayudará a tomar mejores decisiones más precisas en la dinámica de población de la lombriz *Eisenia foetida* que nos servirá de base profesional para orientar a los productores o aquellos que implementan a la lombricultura en los sistemas de reproducción y / o producción.

Objetivos

Crear un modelo de simulación desde la perspectiva del enfoque sistémico para estimar la dinámica de una población ideal de *Eisenia foetida* a partir de datos empíricos obtenidos de condiciones ideales de crianza.

Crear un modelo de simulación para estimar la dinámica de una población de *Eisenia foetida* que incluya los fenómenos de fecundidad, natalidad, mortalidad, supervivencia, promedio de sobrevivientes y tasa intraespecífica de crecimiento a partir de datos empíricos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia de la Lombricultura en el Mundo y en México

La lombricultura es importante a nivel mundial ya que produce materia orgánica y humus (Ferruzzi, 2001). De esta manera la producción lombrícola ha sido vista por sus conocedores como la biotecnología para combatir los efectos de la contaminación en el mundo (Baltierra, 2003; Alanis, 2003). En México la lombricultura es considerada como la actividad económica de gran inversión en empresa tal como Lombrimex y estados como Puebla, Querétaro, Guanajuato, Veracruz, Michoacán entre otros (Martinez, 1996; Capistran et al., 1994), debido a sus productos tales como humus, carne y harina de lombriz (Baltierra, 2003).

Esta actividad se ha expandido a lo largo de la república mexicana debido a sus resultados reflejados en los cultivos tales como maíz, tomate, rábanos y otros. Actualmente en México la lombricultura puede ser la actividad más eficiente desde un punto de vista más agroecológico.

Clasificación Taxonómica de *Eisenia foetida*.

La lombriz de tierra pertenece a la siguiente clasificación taxonómica; pertenece al Phylum Annelida, la clase Oligochaeta, el orden Opisthokonta y la familia Lumbricidae (Edwards y Lofty, 1977; Martinez, 1999; Alanis, 2003).

El Phylum Annelida se divide en lo siguiente

Polichaeta: arenícola o tubículo con muchas quetas

Hirudinea: Sanguijuelas; carecen de quetas

Oligochaeta: Lombrices de tierra pocas quetas

Clase Polichaeta

Presenta cuerpo alargado, consta de una región postamial o cefálica y un tronco. Los apéndices laterales o parápodos, casi siempre son notorios y contienen estructuras carnosas variadas como escamas branquias. Algunos poliquetos son parásitos que viven en agua con salinidad variable y otros cuantos son terrestres.

Clase Hirudíneas (Sanguijuelas)

Son anélidos aplanados dorsoventralmente, presentan setas que se diferencian de otros anélidos, son abundantes en el agua dulce, pero también se encuentran en el agua salada o en tierra, la mayoría son depredadores (Booolootian, 1999; Alanis, 2003).

Clase Oligochaeta

Los oligochaeta son organismos terrestres. Muchos habitan en agua dulce. No presenta parápodos, algunas tienen setas o quetas; la cabeza no tiene apéndice definido. Son hermafrodita pero no presentan estado larvario a partir del huevo (Alanis, 2003). Por otro lado, el Centro de Estudios Agropecuarios en el 2001 (Citado por Alanis, 2003), señala que actualmente existen 7 mil especies diferentes de lombrices, siendo la más conocida la *Lumbricus terrestris*. Sin embargo, solo 2500 especies han sido clasificadas y solo tres de ellas se han domesticado (Alanis, 2003). Un ejemplo de los domesticados es *Eisenia foetida*, la más conocida utilizada en un 80% de los criaderos del mundo y en la que enfocaremos nuestro estudio. Entonces para este fin únicamente estudiaremos a la especie *Eisenia foetida* la cual pertenece a la siguiente clasificación; Clase Oligochaeta; Familia Lumbricidae; Género Lumbricus Eisenia y Especie *Eisenia foetida* (Edwards y Lofty, 1977; Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003). Por tanto la clasificación es como sigue:

Taxonomía de *Eisenia foetida*

Reino	Animal
Phylum	Annélida
Clase	Oligochaeta
Orden	Opisthoros
Familia	Lumbricidae
Genero	<i>Eisenia</i>
Especie	<i>foetida</i>

Hábitos Alimenticios

La lombriz de tierra (*Lumbricus terrestris*) es sin duda la más conocida y estudiada.-Cava galerías en forma de “U”, donde pasa la mayor parte del tiempo; en horas nocturnas sube a consumir restos vegetales, llevándolos hasta el fondo para devorarlos junto con partículas de tierra (Edwards y Lofty, 1977; Lee, 1985). Sin embargo, existe el grupo de las lombrices epigeas, que viven sobre la superficie del suelo que se alimentan de estiércol y hojas secas. Dentro de este grupo se encuentra la especie *Eisenia foetida*, conocida mundialmente como Lombriz Roja Californiana (Alanis, 2003). Esta Lombriz excava galerías ingiriendo todo lo que encuentra a su paso. Mientras realiza esta operación, avanza en el terreno excavando y a la vez comiendo y depositando sus deyecciones (Ferruzzi, 2001).

Hábitos Reproductivos

Las Lombrices son hermafroditas, es decir contienen órganos sexuales masculinos(testículos) y femeninos (ovarios); pero no poseen la particularidad de autofecundarse, es por eso que se reproducen recíprocamente por fecundación cruzada (Compagnoni y Putzolo, 1998). El aparato genital masculino contiene glándulas secretoras de espermias, localizados muy cerca de la boca; mientras que el aparato genital femenino recibe el espermia y lo retiene hasta el momento

de la fecundación (Lee, 1985; Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003). Basándose en estas propiedades el acoplamiento de dos Lombrices es en sentido opuesto la una de la otra de tal manera que se pueda contactar el aparato genital masculino de una con el aparato genital femenino de la otra (Edwards y Lofty, 1977; Ferruzzi, 2001). De esta manera la fecundación se realiza a través del clitelum, glándulas que dan origen al capullo, cápsula o cocon de donde emergen las Lombrices después de 14 a 21 días de incubación (Ferruzzi, 2001).

Ciclo de Vida

Rienes et al, 1999(citado por Alanis, 2003), describe el siguiente ciclo de vida de la Lombriz de tierra.

Etapa Embrionaria

Etapa Postembrionaria

- Fase Postnatal
- Fase Juvenil
- Fase Clitelada
 - *En crecimiento
 - *En decrecimiento
- Fase Senescente

Similarmente a este es el ciclo de vida es el que presenta la especie *Eisenia foetida* con la única diferencia que el ciclo es mas definido por los estadios de Cocon, juveniles, subadultos y Adultos (Ferruzzi, 2001;Shield, 1999; Edwards y Lofty, 1978).

Estadío de Cocon

Esta fase o estadío se da después del acoplamiento de dos lombrices adultas (incluyéndose desde la fecundación hasta la eclosión en un tiempo aproximado de 2 a 3 semanas). Durante el acoplamiento hay un intercambio de

material reproductivo hasta la fecundación. Esta se efectúa a través del clitelum, cuyas glándulas producen el capullo o cocon (Edwards y Lofty, 1977; Ferruzzi; Alanis, 2003). Este presenta un color amarillo verdoso con dimensiones de 2-3 por 3-4 mm. Dicha etapa dura aproximadamente 2 a 3 semanas emergiendo los recién nacidos después de este periodo (Ferruzzi, 2001).

Estadio Juvenil

La fase juvenil se extiende a partir del final de la fase anterior y concluye con la aparición del Clitelum (SubAdulto). Esta fase se caracteriza por una gran actividad y dinamismo que presentan los organismos en un elevado crecimiento en tamaño y peso, durando aproximadamente para esta especie (*Eisenia foetida*) 6 a 10 semanas (5 semanas). Entonces la fase juvenil es caracterizada en el crecimiento continuo que presentan las lombrices recién nacidas hasta alcanzar la formación clitelada (Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003).

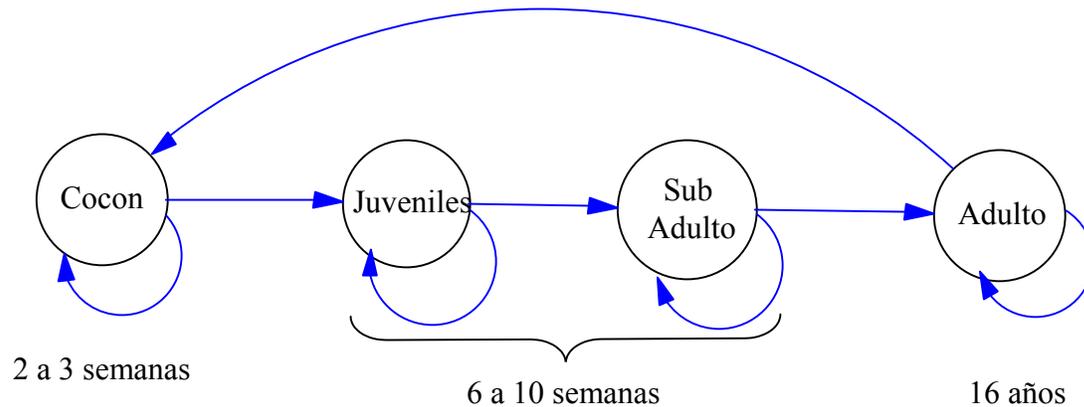
Estadio SubAdulto

Este estadio empieza con la aparición diferencial de la estructura clitelal. A partir de este los individuos son vistos como subadultos comprendidos dentro de un tiempo de permanencia de 4 semanas (Ferruzzi, 2001).

Estadio Adulto

Comienza posteriormente a la anterior observándose deterioro o lesiones en el Clitelum durante los picos de máxima puesta de capullos (Lee, 1985; Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003). Posteriormente comienza a desaparecer el clitelum, este desaparece solo cierto tiempo antes de la muerte de los animales. Esta fase también se caracteriza por la pérdida de la brillante iridiscencia en la coloración, que por lo general se hace más oscura o parda (Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003).

Para resaltar el ciclo de vida de *Eisenia foetida* hemos optado por los métodos demográficos empleados por Ebert (1998) el cual presenta la siguiente estructura del ciclo de vida de la especie.



Factores Limitantes para su Reproducción

El ciclo de vida de la Lombriz de tierra y en particular la especie *Eisenia foetida* esta gobernado por factores tales como temperatura, luz, pH, humedad, y alimentación entre otros.

Temperatura

La temperatura ambiental afecta de una u otra manera a todos los organismos vivos, en general incrementa la velocidad del desarrollo, como resultado de la intensificación del metabolismo. Así la secuencia de apareamiento para la especie *Eisenia foetida* depende de la temperatura del suelo. Por tanto la especie es un organismo de sangre fría (Poikilotermo) por que su calor corporal se obtiene principalmente de la energía externa del ambiente; la cual influye en el ambiente interno del sustrato y este afecta al organismo y a su vez estimula su apareamiento. La temperatura optima de *Eisenia foetida* oscila entre los 19-20°C. esta temperatura debe mantenerse durante su reproducción. De aquí la

importancia de este factor en las tasa reproductivas(2, 3, 4, 5.....21 recién nacidos), ya que si no se controla no se alcanza una tasa de reproducción optima tal como 7 recién nacidos por capullo (Ferruzzi, 2001). Sin embargo, una baja temperatura (15°C) trae consigo una reducción en la velocidad de desarrollo y un crecimiento retardado, entrando en un periodo de latencia, dejando de producir lumbrihumus (Centro de Estudios Agropecuarios, 2001). Mientras que a menos de 10°C las lombrices no pueden sobrevivir (Capistran, et al., 2001), y en temperaturas mayores a 42 °C pueden ser mortales para ellas, provocando la salida a la superficie del sustrato.

Luz

La Lombriz Roja teme a la luz y los rayos ultravioletas la matan. Por esta razón, la iluminación, natural o artificial, no tiene que incidir directamente sobre su hábitat (Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003).

pH

En general las Lombrices pueden desarrollarse apropiadamente cuando el pH esta entre cinco, ligeramente ácido, y ocho, ligeramente alcalino; es decir en rango cercano al siete, que representa al neutro (Alanis, 2003). De esta manera el pH para la Lombriz Roja es de 6.8-7.7 (Ferruzzi, 2001). Por lo tanto un pH neutro - 7 es él optimo para el desarrollo de esta especie. Sin embargo, es recomendable que el alimento que se les suministra a las crías sea ligeramente alcalino, es decir, que tenga un pH entre 7.5 y 8.5. De aquí la importancia de controlar este factor durante la etapa reproductiva así como también en su ciclo de vida (Rienes, et al., 1998; Ferruzzi, 2001; Alanis, 2003).

Humedad

De manera general se puede decir que un puñado de sustancias orgánicas, destinada a servir de alimentación o de sustrato, tiene la humedad adecuada, cuando comprimiéndolo con la mano, no suelta agua; el nivel óptimo de humedad para la Lombriz Roja es de 82.5% (Ferruzzi, 2001). Sin embargo, la humedad promedio mas favorable para las Lombrices es del 85% (Capistran, et al.,2001). Por otra parte existe el método más sencillo y practico que consiste en tomar una porción del sustrato y apretarlo con fuerza. La humedad se calcula según el numero de gotas de agua que se destile del mismo (Rienes, et al., 1998).

Alimentación

La alimentación es dada a partir de materiales orgánicos, mejor si son ricos en celulosa (20% del volumen). Es aconsejable el estiércol del ganado equino, paja o cartón previamente bien mojado o empapado en agua. El espesor del sustrato inicial debe de ser de unos 15 cm, para el lecho en verano y de 25 cm, para el lecho en invierno (Ferruzzi, 2001).

La sustancia orgánica debe ser identificada como una indicación sobre su calidad. Teniendo en cuenta que la Lombriz objeto del presente estudio, se alimenta con cualquier tipo de sustancia orgánica, que haya superado su estado de calentamiento como consecuencia de su putrefacción y posterior fermentación (Ferruzzi, 2001; Baltierra, 2003). Independientemente del cual sea la sustancia orgánica que se deseé utilizar, esta debe tener un contenido en celulosa no inferior a un 20-25%, en forma de paja triturada, papel o cartón (Ferruzzi, 2001).

Por ejemplo:

Estiércol de conejo.....	10%
Estiércol de equino.....	15%
Estiércol de bovino.....	35%
Estiércol de ovino.....	10%
Estiércol de porcino.....	30%

Estos porcentaje representan un balance nutricional en la dieta alimenticia en la Lombriz Roja. Tales niveles de % N consideran una mejor capacidad reproductiva. Sin embargo, los estiércoles procedentes de explotaciones extensivas de pollos, pavos y de aves en general no son aconsejables debido a su fuerte acidez, ocasionada por la elevada temperatura durante la fermentación(90°C) y el prolongado espacio de tiempo necesario (14, 16, 17 meses) para que esta concluya y poder obtener un valor de pH 7.0

Enfoque Sistémico

Análisis de Sistemas Y Simulación

El origen del análisis de sistemas se remonta al periodo de la segunda guerra mundial y estuvo relacionado con la solución de problemas logísticos complejos(Grant et al., 1997). El análisis de sistemas es tanto una filosofía como un conjunto de técnicas, que han sido desarrolladas explícitamente para enfrentar problemas que comprendan relaciones complejas (Saravia, 1985; Grant et al., 1997; Thornley, 1998). El análisis de sistemas se basa en un planteamiento holístico para la solución de problemas y usa los modelos matemáticos para identificar e imitar las características importantes de los sistemas (Grant et al., 1997; Ford, 1999; Peart y Carry, 1998). Sin embargo, los modelos matemáticos no proporcionan por si mismos las hipótesis y leyes científicas para generar nuestras teorías; solo son herramientas cuantitativas para expresar esas ideas científicas (Thornley, 1998).

Los modelos matemáticos actualmente han sido utilizados en áreas tales como ingeniería industrial, administración de empresas, economía y agricultura entre otras (Grant, 1997; Thornley, 1998; Harrell, et al., 2000).

Sistema

Cualquier conjunto de objetos que interactúan pueden ser considerado como un sistema. Entonces un sistema es un conjunto de procesos interconectados caracterizado por muchas vías reciprocas de causa y efecto (Grant et al., 1997).

Un sistema es un conjunto de componentes interrelacionados que poseen un limite y funcionan como una unidad (Capra, 1996; Grant et al., 1997). Los sistemas tienen propiedades de importancia particular, los sistemas pueden estar unidos como por ejemplo ambiente-organismo de esta manera, un individuo es parte de una población, una población es parte de una comunidad y así sucesivamente (Grant et al., 1997; Ebert, 1998).

En definitiva el análisis de sistemas es un enfoque metodológico científico relacionado con problemas complejos y para ello hace uso de la matemática compleja, procedimientos estadísticos y computadoras (Grant, et al., 1997; Peart y Carry, 1998).

Simulación

Simular es emplear un modelo para imitar, o describir paso a paso el comportamiento del sistema que se está estudiando (Grant et al., 1997). Los modelos son abstracciones de la realidad y por lo tanto los modelos de simulación están compuestos por una serie de operaciones aritméticas y lógicas que en conjunto representan la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Innis, 1978; Abogado, 1989; Johnson y Thornley, 1990; Grant et al., 1997; Thornley, 1998; Peart y Carry, 1998; Harrell, et al., 2000). Los modelos dinámicos de simulación son capaces de relacionar variables complejas tales como los ambientales y poblacionales, siempre y cuando se cuente con un buen antecedente de estos factores, siendo este el cuello de botella para incluir un gran numero de situaciones en la predicción del ciclo de vida de la lombriz (*Eisenia foetida*)

Dinámica Poblacional

De manera general la estructura de edades es un atributo importante que afecta el crecimiento de una población en la cual las generaciones se traslapan (Grant, et al., 1997). La natalidad y mortalidad generalmente se distribuyen en forma desigual a través de las edades y esto se refleja en la historia de vida de las especies (Grant, et al., 1997; Ebert, 1998; Ford, 1999). Como consecuencia, el crecimiento poblacional depende en parte de la distribución de la natalidad y mortalidad en las diferentes edades las cuales son características de las especies; y en parte de la distribución actual del número de individuos en cada clase de edad, lo que refleja las condiciones ecológicas recientes a las cuales ha estado expuesta la población. Sin embargo, no únicamente estos atributos gobiernan el comportamiento poblacional en las especies, también los factores ambientales tales como temperatura, luz, humedad y pH entre las más importantes. Estos factores en si son llamadas variables rectoras (Driven), es decir, variables que manejan el genotipo de las especies (sistemas) y por consiguiente provocan cambios en los individuos de una población a lo largo del tiempo (estructura de edades).

Conceptos Poblacionales

Fecundidad y Natalidad

La fecundidad es el número de hijas o descendientes por madre en un tiempo x (Pianka, 1978). De esta manera, la fecundidad es el número de nacimientos vivos producidos durante un intervalo de tiempo por especies maduras sexualmente (Caughley, 1978). Entonces la fecundidad es el número de descendientes por cada hembra durante un determinado tiempo (Ebert, 1998). Por lo tanto, para este estudio es el número de hermafroditas descendientes por cada hermafrodita madura sexualmente. De esta manera la fecundidad está relacionada con la cantidad de espermias fértiles involucrados durante el fenómeno

reproductivo de la especie. Con esta idea se parte a denominar a la fecundidad de “uno” como valor constante, lo que significa que todos los nacimientos o descendientes vivos de la hermafrodita (*Eisenia foetida*) en un intervalo de tiempo generacional es del 100 %. De este modo, la natalidad es el número de individuos nacidos por hembra (Ebert, 1998; Caughley, 1978) u hermafrodita. Por tanto la simbología empleada para esta descripción es la siguiente

Fecundidad : μ_x

Natalidad : β_x

Supervivencia, Mortalidad y Promedio de Sobrevivientes

La supervivencia se define como el cociente del número de sobrevivientes al inicio de la clase siguiente y al número de sobrevivientes al inicio de la clase inicial (El final de una Cohorte es el inicio del otro) Ebert (1998). Por lo tanto, la supervivencia define directamente a los sobrevivientes es decir, al número de individuos que sobreviven en cada intervalo o clase. De la misma manera la supervivencia afecta indirectamente a la mortalidad, dando origen al número de individuos muertos por unidad de tiempo y generación (Pianka, 1978; Pool, 1978). Entonces, la supervivencia está relacionada con los individuos que mueren y los que sobreviven en un tiempo generacional (Ebert, 1998). Con base a esta descripción se presentan las siguientes ecuaciones con sus respectivas simbologías.

Probabilidad de Supervivencia; $P_x = \frac{l_{x+1}}{l_x}$

Donde:

P_x denota a la probabilidad de supervivencia

l_{x+1} número de sobrevivientes al inicio de la clase siguiente

l_x número de sobrevivientes al inicio de la clase inicial

Promedio de Supervivencia entre dos edades; $L_x = \frac{(l_{x+1}) + l_x}{2}$

Donde:

L_x Promedio de Supervivencia

l_{x+1} Supervivientes al inicio de la clase

l_x Número de supervivientes al inicio de cada intervalo de clase

Mortalidad

δ_x mortalidad

Índice de reproducción medio

El índice de reproducción medio es la tasa instantánea de crecimiento poblacional (Pianka, 1978). Por tanto el índice de reproducción medio es la razón intraespecífica de crecimiento constante que se simboliza con la letra " r_x "

MATERIALES Y METODOS

Descripción del modelo

El modelo fue creado en el área de Fisiología Vegetal correspondiente al departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Para crear este sistema fue necesario, la obtención de datos empíricos de la lombriz *Eisenia foetida* tales como índice de reproducción medio, supervivencia y mortalidad publicados por Ferruzzi (2001), Edwards y Lofty (1977) y Alanis (2003). Con estos principios e introduciendo uno de los métodos de demografía (estructura de edades) publicados por Ebert (1998), Emmel (1977) y Pianka (1978), se crea un modelo dinámico de simulación ideal para mimetizar el ciclo de vida de la especie *Eisenia foetida* en conjunto con sus atributos ecológicos. Así con esta perspectiva se crea el modelo en los Softwares Stella ver. 2.0, VensimPle ver. 5.1b configurados para una computadora Alaska pentium III. Con el fin de simular el ciclo de vida de la especie (*Eisenia foetida*), el modelo distingue el efecto de la población inicial, índice de reproducción medio, mortalidad y probabilidades de supervivencia durante los estadios de cocon, juvenil, subadulto y adulto.

El sistema está compuesto de 13 variables de estado con las que es posible simular la estructura y dinámica de la población con intervalos de una semana. En el sistema simulado no se consideran factores ambientales tales como temperatura, pH, radiación, sustrato entre los más importantes. Sin embargo, parámetros tales como supervivencia, mortalidad, fecundidad incluyen implícitamente a estos factores. Por lo tanto, se parte de parámetros constantes y no de parámetros oscilatorios. Así de esta manera las variables y sus respectivos factores determinan el cambio de estado de la población de la lombriz *Eisenia foetida*.

Etapas de creación del modelo

Etapa I

Esta etapa consistió en la identificación de los datos empíricos publicados por Ferruzzi (2001), con simbologías empleadas por Pool (1977), Ebert (1998), Caughley (1978), Pianka (1978) y Tanner (1978) en textos de ecología de poblaciones. La simbología de referencia incluye N_x , L_x , r_x , m_s . Cada una presenta sus propios atributos ecológicos tales como N_x quien denota la población inicial en el tiempo x ; L_x se refiere al promedio de sobrevivientes entre dos edades; r_x representa la razón intraespecifica constante de crecimiento; y m_s es el tiempo de la madurez sexual en s semanas para todos los descendientes. Sin embargo, para este estudio se utilizará L_x para señalar la población inicial producto ya de una sobrevivencia, con una r de 2-21 recién nacidos por individuo.

A continuación se presentan una descripción de los datos empíricos de aumento poblacional de *Eisenia foetida* obtenidos bajo condiciones de cautiverio publicados por Ferruzzi (2001) y posteriormente sus respectivas simbologías ecológicas.

El cuadro 1 describe el aumento de la población, a partir de dos pie de crías en condiciones controladas. Por tanto, estos al aparearse dan origen a 4 recién nacidos si su r es de dos. De la misma manera es para todas las edades, con una r de 2 y 21 recién nacidos por lombriz (Apéndice 2). De este modo, el cuadro muestra que para la primera semana hay dos adultos más los recién nacidos (4), que a su vez para la semana 14 la descendencia habrá alcanzado su respectiva madurez sexual y por consiguiente se reproducirán los adultos como sus descendientes dando origen para este entonces (14 semanas) 12 recién nacidos y así sucesivamente con los demás descendientes y adultos en el tiempo (0-52 semanas). Esto se explica mejor con las siguientes simbologías del Apéndice 1 que representan al cuadro 1.

Cuadro 1. Aumento de la población de un lecho(2 x 1 m) en el periodo de un año con una r de 2 recién nacidos por lombriz (Ferruzzi, 2001).

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	De la 40ª a la 52 semana
1 – 2 x 2 = 4	14 – (2+ 4) x 2= 12	27 – (2+ 4+ 12) x 2= 36	40 – (2+ 4+ 12+ 36) x 2= 108
2 – 2 x 2 = 4	15 – (2+ 8) x 2= 20	28 – (2+ 8+ 20) x 2= 60	41 – (2+ 8+ 20+ 60) x 2= 180
3 – 2 x 2 = 4	16 – (2+12) x 2= 28	29 – (2+12+ 28) x 2= 84	42 – (2+12+ 28+ 84) x 2= 252
4 – 2 x 2 = 4	17 – (2+16) x 2= 36	30 – (2+16+ 36) x 2= 108	43 – (2+16+ 36+108) x 2= 324
5 – 2 x 2 = 4	18 – (2+20) x 2= 44	31 – (2+20+ 44) x 2= 132	44 – (2+20+ 44+132) x 2= 396
6 – 2 x 2 = 4	19 – (2+24) x 2= 52	32 – (2+24+ 52) x 2= 156	45 – (2+24+ 52+156) x 2= 468
7 – 2 x 2 = 4	20 – (2+28) x 2= 60	33 – (2+28+ 60) x 2= 180	46 – (2+28+ 60+180) x 2= 540
8 – 2 x 2 = 4	21 – (2+32) x 2= 68	34 – (2+32+ 68) x 2= 204	47 – (2+32+ 68+204) x 2= 612
9 – 2 x 2 = 4	22 – (2+36) x 2= 76	35 – (2+36+ 76) x 2= 228	48 – (2+36+ 76+228) x 2= 684
10 – 2 x 2 = 4	23 – (2+40) x 2= 84	36 – (2+40+ 84) x 2= 252	49 – (2+40+ 84+252) x 2= 756
11 – 2 x 2 = 4	24 – (2+44) x 2= 92	37 – (2+44+ 92) x 2= 276	50 – (2+44+ 92+276) x 2= 828
12 – 2 x 2 = 4	25 – (2+48) x 2= 100	38 – (2+48+ 100) x 2= 300	51 – (2+48+100+300) x 2= 900
13 – 2 x 2 = 4	26 – (2+52) x 2= 108	39 – (2+52+ 108) x 2= 324	52 – (2+52+108+324) x 2= 972

Los cuadros 2, 3, 4 y 5 del apéndice 1 muestran a las simbologías que representa el aumento acumulativo de una población ideal de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) al igual que los intervalos de tiempos (semanas) cuando $L_0 = 2$; $r = 2$

Etapa II

Una segunda etapa consistió en encontrar el modelo poblacional al final de cada 13 semanas de edad de la población. Para abordar esta descripción es necesario reconsiderar la etapa I, por lo que esta proporcionan la simbología para crear el modelo de la población de la lombriz *Eisenia foetida*.

Las Simbologías al final de cada 13 semanas de edad con sus respectivos parámetros tales como L_0, m_s, r fueron agrupadas en cuatro bloques, a saber:

a) 0 – 13

$$[L_0 + m_s \cdot L_0 \cdot r]$$

Ec. 1

b) 14 – 26 Semanas

$$[(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o.r + m_s.L_o.r.r)] \quad \text{Ec. 2}$$

c) 27 – 39 Semanas

$$[L_o + m_s(L_o.r)] + (L_o.r + m_s.L_o.r.r) + [L_o.r + m_s.L_o.r.r + L_o.r.r + m_s.L_o.r.r.r] \quad \text{Ec. 3}$$

d) 40 – 52 Semanas

$$(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o + m_s.L_o.r).r + [(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o + m_s.L_o.r).r]r \\ + \{(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o + m_s.L_o.r).r + [(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o + m_s.L_o.r).r].r\}r \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

L_o Es la población inicial

m_s Es el tiempo en semanas para alcanzar la madurez sexual

r Es la razón de cambio intraespecifica constante de crecimiento.

Desde esta perspectiva se crea el modelo exponencial de población lombrícola (*Eisenia foetida*) simplificado, el cual es como sigue.

Para 0 – 13 semanas se obtiene el siguiente modelo (1er bloque)

$$(L_o + m_s.L_o.r) \quad \text{Ec. 5a}$$

14 – 26 (2do bloque)

$$[(L_o + m_s.L_o.r) + (L_o.r + m_s.L_o.r.r)]$$

$$= (1 + m_s.r) + (r + m_s.r.r)$$

$$= (1 + m_s.r) + (1 + m_s.r).r$$

$$= (1 + r)(1 + m_s.r)L_o$$

$$= L_o + m_s.L_o.r(1 + r)$$

Ec. 6b

27 – 39 (3er bloque)

$$\begin{aligned}
 & [L_o + m_s(L_o.r)] + (L_o.r + m_s L_o.r.r) + [L_o.r + m_s L_o.r.r + L_o.r.r + m_s L_o.r.r.r] \\
 & = (1 + m_s.r) + (r + m_s.r.r) + (r + m_s.r.r) + (r.r + m_s.r.r.r) \\
 & = (1 + m_s.r) + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r + (r + m_s.r.r).r \\
 & = (1 + m_s.r) + 2(1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r.r \\
 & = (1 + 2r + r.r)(1 + m_s.r) \\
 & = (1 + r)^2 (1 + m_s.r)L_o
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 7c}$$

40 – 52 (4to bloque)

$$\begin{aligned}
 & (L_o + m_s L_o.r) + (L_o + m_s L_o.r).r + [(L_o + m_s L_o.r) + (L_o + m_s L_o.r).r]r \\
 & + \{(L_o + m_s L_o.r) + (L_o + m_s L_o.r).r + [(L_o + m_s L_o.r) + (L_o + m_s L_o.r).r].r\}r \\
 & = (1 + m_s.r) + (r + m_s.r.r) + (r + m_s.r.r) + (r.r + m_s.r.r.r) + (r + m_s.r.r) + (r.r + m_s.r.r.r) \\
 & + (r.r + m_s.r.r.r) + (r.r.r + m_s.r.r.r.r) \\
 & = (1 + m_s.r) + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r + (r + m_s.r.r).r + (1 + m_s.r).r + (r + m_s.r.r).r \\
 & + (r + m_s.r.r).r + (r.r + m_s.r.r.r).r \\
 & = (1 + m_s.r) + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r.r + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r).r.r \\
 & + (1 + m_s.r).r.r + (r + m_s.r.r).r.r \\
 & = (1 + m_s.r) + (1 + m_s.r)r + (1 + m_s.r).r + (1 + m_s.r)r.r + (1 + m_s.r)r + (1 + m_s.r)r.r + (1 + m_s.r)r.r \\
 & + (1 + m_s.r)r.r.r \\
 & = (1 + m_s.r) + 3(1 + m_s.r)r + 3(1 + m_s.r)r.r + (1 + m_s.r)r.r.r \\
 & = (1 + 3r + 3rr + r.r.r)(1 + m_s.r) \\
 & = (1 + r)^3 (1 + m_s.r)L_o
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 8d}$$

Por lo tanto deducimos que para el final de m_s semanas el modelo que opera en el comportamiento de crecimiento de población de lombriz es el siguiente

$$S_n = S_o(1 + r)^n \tag{Ec.9}$$

Donde:

n ; Es el número de orden (bloques) de m_s semanas

S_o ; Es el valor de la población al final de m_s semanas ($S_o = L_o + m_s \cdot L_o \cdot r$)

A hora cuando S_n sea igual a S_1 , el valor de la población será al final del segundo orden u bloque. Así de esta manera:

$$S_1 = S_o + S_o \cdot r \quad \text{Ec. 10}$$

Cabe señalar que esta ecuación es el punto de partida para la solución analítica, la cual en forma desglosada nos da la oportunidad de crear al sistema de simulación de la especie en cuestión

Similarmente para S_2

$$S_2 = S_1 + S_1 \cdot r \quad \text{Ec. 11a}$$

Finalmente

$$S_3 = S_2 + S_2 \cdot r \quad \text{Ec. 12b}$$

hasta

$$S_n = S_{n-1} + S_{n-1} \cdot r \quad \text{Ec. 13c}$$

De esta manera se obtiene la expresión que corresponde a un crecimiento exponencial discreto, donde:

$$\begin{aligned} S_o &= L_o + m_s L_o \cdot r \\ S_1 &= S_o + S_o \cdot r \\ &= S_o (1 + r)^1 \end{aligned} \quad \text{Ec. 14d}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 + S_1 \cdot r \\ &= S_o (1 + r) + S_o (1 + r) \cdot r \\ &= (1 + r)(S_o + S_o \cdot r) \\ &= (1 + r)S_o (1 + S_o \cdot r) \\ &= S_o (1 + r)(1 + r) \\ S_2 &= S_o (1 + r)^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. 15e}$$

hasta

$$S_n = S_o (1 + r)^n \quad \text{Ec. 16f}$$

← Solución analítica

La presente solución analítica estima la población al final de m_s semanas (1, 2, 3, .. n semanas). Por lo tanto, es un modelo de crecimiento exponencial discreto con parámetros iniciales tales como:

S_o ; Es la condición inicial parametrizada por $L_o + m_s.L_o.r$. De donde L_o es la población inicial, m_s es el tiempo en S semanas para alcanzar la madurez sexual y r es la razón intraespecífica de crecimiento constante (2 y 21 recién nacidos).

Ejemplo de la predicción de la población de lombriz *Eisenia foetida* con base en la solución analítica.

Parámetros iniciales

$L_o = 2$; Lombrices

$r = 2$; Tasa de crecimiento

$m_s = 13$ (Semanas) madurez sexual

$n = 0$

Con estos factores se predice el aumento de la población al final de las 13 semanas.

Entonces cuando $n = 0, 1, 2$ y 3 la población al final de las 13 semanas es:

$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
$S_n = S_o(1+r)^n$	$S_n = S_o(1+r)^n$	$S_2 = S_o(1+r)^n$	$S_3 = S_o(1+r)^n$
$S_o = S_o(1+r)^0$	$S_1 = S_o(1+r)^1$	$= 54(1+2)^2$	$S_3 = 54(1+2)^3$
$S_o = L_o + m_s.L_o.r$	$S_1 = 54(3)$	$= 54(9)$	$S_3 = 54(27)$
$= 2 + 13 * 2 * 2$	$S_1 = 162$	$= 486$	$S_3 = 1458$
$= 54$			

Estas predicciones hacen referencia a la suma del orden u bloques, cuando n es igual a 0, 1, 2, 3. Es decir cuando n sea igual a "0" la población al final del bloque es 54 recién nacidos. Por lo tanto, cuando n es igual a 1 los recién nacidos sumados serán 162 (54+108), y así sucesivamente para los demás n bloques, que se demuestran en las estimaciones. Sin embargo, en las tablas de aumento de la población publicadas por Ferruzzi (2001), solo consideran al aspecto reproductivo de la especie, incluyendo únicamente a los recién nacidos del final del bloque (13

semanas), que para la semana 26 serán maduros sexualmente y por lo tanto, se reproducirán con una r igual a $2(54*2)$, como lo detallan las tablas de aumento de la población publicadas por Ferruzzi (2001) Apéndice 2.

Etapa III

Para esta etapa es de particular importancia reconsiderar a la solución analítica (Crecimiento exponencial discreto) creada en la etapa II, e incorporación de la información del ciclo de vida o biológico de la especie para que con ellos en conjunto pueda estructurarse a la población por estadios u etapas. Así finalmente serán representados de manera cuantitativa en un modelo dinámico de simulación.

De esta manera se escribe a la solución analítica en forma desglosada con su respectiva interpretación cuantitativa.

$$S_n = (L_o + m_s \cdot L_o \cdot r)(1 + r)^n$$

Por lo tanto, la solución analítica desglosada (Ec. 16f), es:

$$S_n = L_o(1 + r)^n + r_1 \cdot L_o(1 + r_1)^n + r_2 \cdot L_o(1 + r_2)^n + r_3 \cdot L_o(1 + r_3)^n + \dots r_{13} \cdot L_o(1 + r_{13})^n$$

Es decir cuando n sea igual a 0, 1, 2, 3 la expresión dará los resultados que se presentan en el cuadro 10

Cuadro 10. Estimación total de la población de lombriz de *Eisenia foetida* con base en la solución analítica desglosada con “n” bloques.

Tiempo (Semanas)	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	E d a d e s
0 - - - - - - - - - - 2		6	18	54	Edad 13
1 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 12
2 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 11
3 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 10
4 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 9
5 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 8
6 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 7
7 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 6
8 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 5
9 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 4
10 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 3
11 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 2
12 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 1
13 - - - - - - - - - - 4		12	36	108	Edad 0

El cuadro 10. Muestra los valores totales del aumento de la población de lombriz *Eisenia foetida*, con base en la solución analítica desglosada y con la relación de recurrencia (Ec. 13 c).

Con los valores totales de cuadro 10 al igual que con la relación de recurrencia se desarrolla un sistema por estructura de edades (biológicas). Con esta perspectiva se estructura el modelo dinámico de simulación que incorpore en su sistema, la evolución acumulada de reproducción de la población de lombriz *Eisenia foetida*.

Diagrama de Simulación

Para crear este diagrama se utilizó la información de poblaciones de supervivencia de la estructura de la población de *Lumbricus terrestris* publicada por Shield (1999); Edwards y Lofty (1977), debido a la carencia de información correspondiente a la especie estudiada. Estos autores reportan los siguientes datos en la estructura de la población de *Lumbricus terrestris* . Para poblaciones de lombrices maduras reportan 8, 13 para lombrices inmaduras grandes, 30 inmaduras pequeñas y para capullos 2/mes ó 2cap/4 semanas. Estas

probabilidades de supervivencia al igual que la solución analítica desglosada son considerados para la estructura del modelo de la especie *Eisenia foetida*. De esta manera, en conjunto con las etapas de creación del modelo se aborda a la estructuración del modelo dinámico de simulación. Con este enfoque, usando la simbología empleada por Tanner (1978), Ferruzzi (2001) y Alanis (2003) del estadio de cocon, juveniles, subadultos y adulto e incluyendo el método de estructura de edades de poblaciones, publicada por Ebert (1998). Se desarrolla el sistema como sigue.

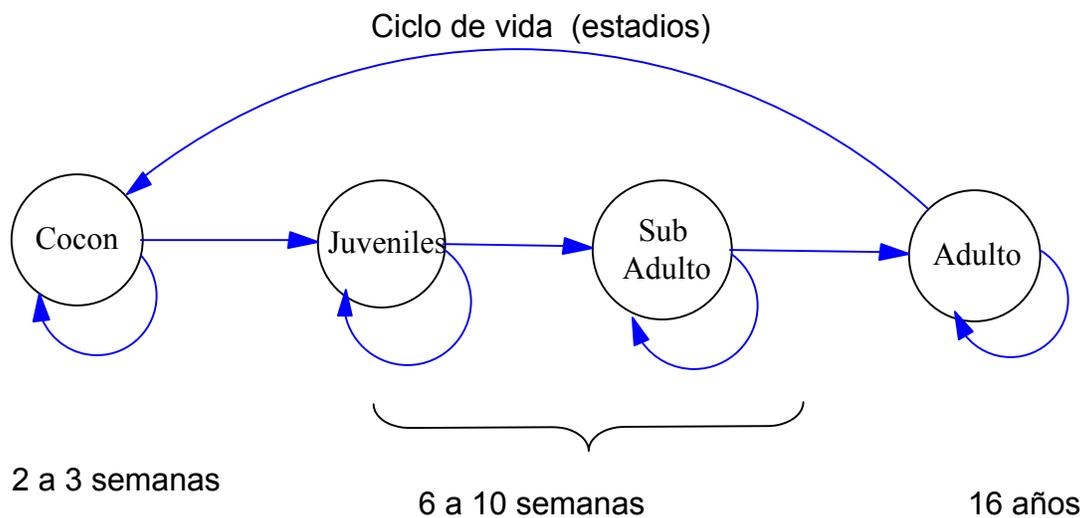


Figura 1. Estructura de edades para el modelo de la especie *Eisenia foetida*.

Diagrama simbólico de estructura de edades

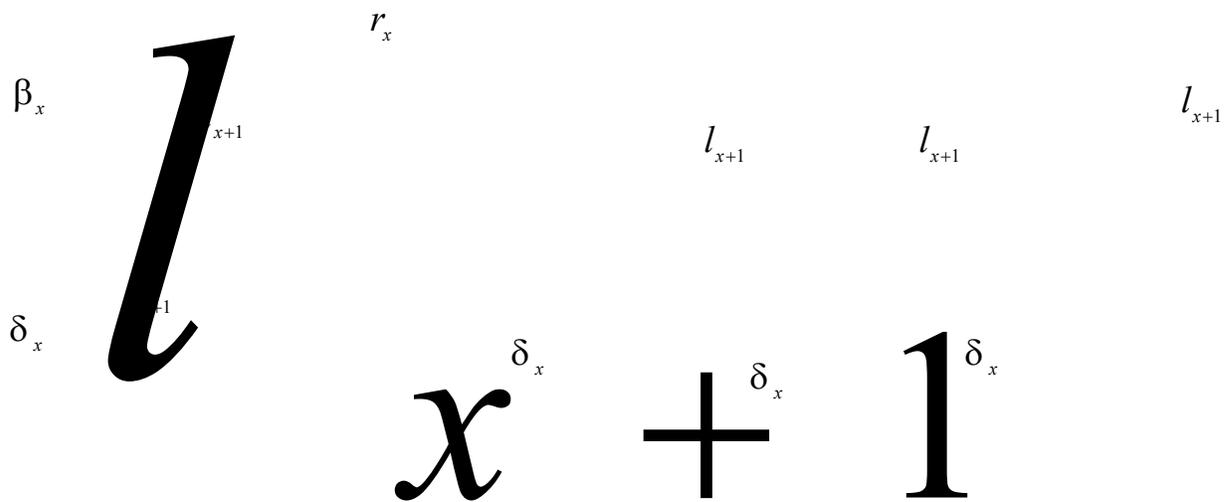


Figura 2. Diagrama conceptual simbólico del modelo de simulación (Eisenia foetida).

Esta figura muestra los cambios que resultan de la fecundidad, natalidad, mortalidad, razón instantánea de crecimiento y probabilidades de supervivencia en el número de los individuos en los estadios L_x .

Por lo tanto, la simbología que representa a los cambios en las clases de edades (L_x) es la siguiente

μ_x ; *Fecundidad*

δ_x ; *Mortalidad*

r_x ; Razón de cambio constante de crecimiento

P_x ; Probabilidad de supervivencia

l_{x+1} ; *Sobrevivientes*

β_x ; *Natalidad*

L_x ; Población inicial en el tiempo x

Similarmente se desarrollará un segundo diagrama de simulación que involucre los estadios fenológicos de cocon, juvenil, subadulto y adulto con sus respectivos tiempos de permanencia. Con esta lógica se crea el siguiente modelo conceptual que representa el ciclo de vida de la lombriz *Eisenia foetida*. Entonces mediante un modelo conceptual representaremos el crecimiento de la población que incluya a la estructura por edades (biológica), el cual se desglosa en siguiente diagrama de simulación (Figura 3).

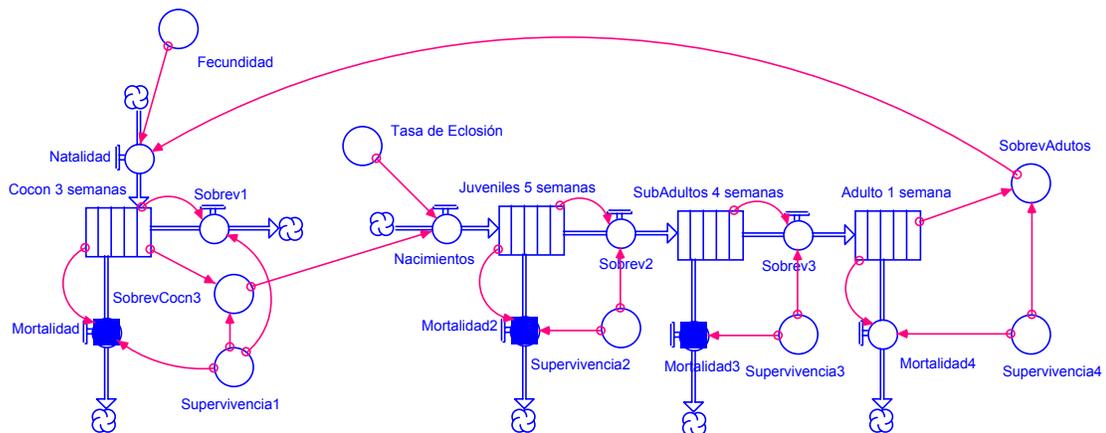


Figura 3. Diagrama conceptual del modelo dinámico de simulación para la lombriz *Eisenia foetida*. Estos diagramas, representan al ciclo de vida de la especie de forma simbólica y conceptualmente por estadios presentes en la estructura de la población.

El Modelo

El modelo considera 13 categorías en la estructura de la población, correspondiendo a los estadios de cocones y de lombrices con sus respectivas edades (Figura 4). Los cuales presentan las siguientes características.

Cocon

El estadio de cocon incluye tres categorías que comprenden desde la incubación hasta la eclosión, es decir permanece en esta etapa tres semanas.

Juveniles

Esta etapa comprende cinco categorías dentro de las cuales se incluyen a los recién nacidos y a las lombrices jóvenes, durando estos en dicha etapa un tiempo de cinco semanas.

SubAdultos

Para las edades de subadultos se incluyen cuatro categorías, de las cuales forman parte las lombrices inmaduras grandes, con permanencia de cuatro semanas en el estadio.

Adultos

Las lombrices de edad adulta o maduras sexualmente(13 semanas), son las que dan origen al apareamiento y este a su vez a nuevas lombrices, producto de una eclosión e incubación.

FIGURA 4

A continuación se describen los parámetros como las ecuaciones de cada una de las categorías que constituyen al modelo dinámico de simulación de la lombriz *Eisenia foetida*, de acuerdo a las figuras 2, 3 y 4.

Fecundidad

Parámetro constante que controla al numero de descendientes por madre. De aquí que la fecundidad para nuestro propósito sea considerada como parámetro constante, es decir el numero de hijas es igual al numero de madres. De esta manera el número de hermafroditas hijas es igual al numero de hermafroditas madres. Por lo tanto, la fecundidad tendrá un valor constante de uno cuando el número de hermafroditas hijas sea igual al numero de hermafroditas madres(# hijas/# madres); es decir la fecundidad es igual al 100 %. Entonces la fecundidad es como sigue:

$$\mu_x = 1$$

Donde

μ_x ; fecundidad en unidades de cocones / lombrices

Natalidad

La natalidad es la causa básica del ingreso de individuos a las poblaciones y a su vez es el resultado de la reproducción exitosa de los organismos (Saruhkán, 1987). En este sentido la natalidad esta relacionada con la fecundidad, de modo que la natalidad es el resultado final del apareamiento de los individuos (Tanner, 1978). Con base en esto, y con la metodología cuantitativa descrita por Ebert (1999) se estima a la natalidad para la especie *Eisenia foetida* la cual es como sigue:

La natalidad se determina partir de la fecundidad a partir de la fecundidad (número de descendientes hijas / numero de madres) multiplicado por los sobrevivientes sexualmente maduros, es decir el numero de individuos nacidos durante un periodo de tiempo estarán en función del numero de individuos

(maduros sexualmente) que sobrevivan en la edad adulta (individuos adultos). De modo que el número los sobrevivientes dependerá de la mortalidad y de las probabilidades de supervivencia (Figura 4). Por lo tanto, la variación poblacional es causa de la interacción denso-dependiente de los cambios que resulten de la natalidad, mortalidad así como también de la magnitud de observación de estos, que se escriben como:

$$\beta_x = \mu_x \cdot l_{x_n+1} \quad \text{Ec. 17}$$

De donde la natalidad es una razón de cambio (tasa), es decir incluye un componente de tiempo que se representa como: $\frac{\beta_x}{dt}$.

Donde:

β_x ; Es la natalidad en unidades de [*cocones / semanas*]

$\mu_x = 1$ en unidades de [*cocones / lombrices*]

l_{x_n+1} ; Representa a los sobrevivientes de cada una de las categorías con “n” orden. De esta manera

$$P_{x_n} = \frac{l_{x_n+1}}{l_{x_n}} =$$

$$l_{x_n+1} = L_{x_{n-1}} \cdot P_{x_n} \quad \text{Ec. 18}$$

Cabe destacar que la simbología $Lx = l_x$ (Tanner, 1978). Sin embargo la única diferencia existe en los subíndice, pero cabe recordar que “n” solamente indica el orden para la estructura cuantitativa del sistema (Figura 4), a excepción de n-1. Esta excepción indica que existe una relación de recurrencia.

Por consiguiente para la categoría 13 será.

Donde:

$L_{x_{n-1}}$; Es el numero de individuos o población que se encuentran en cada categorías comprendidas para cada uno del estadio de cocon, juvenil, subadulto y adulto. Es decir desde $L_{1_{n-1}}, L_{2_{n-1}}, L_{3_{n-1}} \dots L_{13_{n-1}}$.

P_{x_n} ; es la supervivencia para cada uno de los sobrevivientes presentes durante el transcurso de las 13 semanas.

Con base en estos señalamientos la natalidad incluye a los sobrevivientes de la edad 13 los cuales cuantitativamente serán:

$$l_{x_{13}+1} = L_{13_{n-1}} \cdot P_{x_{13}}$$

De donde

$L_{13_{n-1}}$; es el número de lombrices maduras sexualmente (edad 13), en unidades de lombrices

$P_{x_{13}}$; Probabilidad de supervivencia para los sobrevivientes de edad 13 (probabilidad de supervivencia en función de la esperanza de vida 16 años). En unidades de: $[1 / \text{semanas}]$. Por lo tanto, $l_{x_{13}+1}$ tendrá unidades de: $[\text{lombrices} / \text{semanas}]$, y por consiguiente la natalidad denotará unidades de: $[\text{cocones} / \text{semanas}]$.

Mortalidad

La mortalidad es la causa básica de pérdida de individuos de una población (Saruhkan, 1987). Con esta idea al igual que con los enfoques utilizados por Tañer (1978), Ebert (1998) para estimar la mortalidad en poblaciones, la mortalidad para este fin es como sigue.

$$\delta_{x_n} = (1 - P_{x_n}) \cdot Lx_{n-1} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

S_{x_n} ; Es la mortalidad de los individuos de cada una de las categorías que conforman al modelo, en unidades de $[\text{cocones} / \text{semanas}]$.

P_{x_n} ; Denota a las probabilidades o proporciones de supervivencias tanto ideales (1), como de proporciones publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1977) con "n" orden para cada una de las categorías del sistema, en unidades de $[1 / \text{semanas}]$.

Lx_{n-1} ; Es la población presente en cada una de las categorías (0 – 13) que comprende el modelo con x orden y con la única noción de la relación de recurrencia ($n - 1$). Cabe enfatizar que esta simbología es implementada en ecología de poblaciones por Tanner (1978). De aquí la idea de utilizarla para nuestro fin (Modelo Dinámico Simulación para la lombriz *Eisenia foetida*). Tomando en cuenta esta descripción la mortalidad de una primera categoría $L1_{n-1}$ (cocon1) será

$$\delta_{x_1} = (1 - P_{x_1}) \cdot L1_{n-1}$$

Donde

P_{x_1} ; es la probabilidad de supervivencia para una primera categoría del estadio de cocon en unidades de $[1 / \text{semanas}]$, y así consecutivamente para cada una de las supervivencias incluidas en cada una de las estructuras que conforman a los estadios que se presentan en el ciclo de vida de lombriz *Eisenia foetida*. Para el caso de una población ideal hemos considerado una probabilidad de supervivencia de 1, lo que significa que los nacimientos vivos sobreviven durante todo el ciclo de vida de la especie. De esta manera las probabilidades definen a los sobrevivientes que formaran parte de la siguiente categoría. Sin embargo, en la naturaleza y específicamente en las poblaciones los fenómenos son cambiantes para cada instante de los comportamientos naturales y poblacionales. De aquí las poblaciones presenten tendencias tales como rapidez o razones de cambio (crecimiento o de crecimiento). Con esta perspectiva se utilizarán las probabilidades de supervivencia del cuadro 7 (proporciones) de la lombriz de tierra

Cuadro 11. Probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1977).

Estadio y / o edades	Estadio	Estadíos (Edades)		
	Cocon	Juvenil	SubAdulto	Adulto
Proporciones	2 / mes	30	13	8

El presente cuadro(11) muestra las proporciones de supervivencias en el estadio de cocon así como también las presentes en los estadios de juvenil, subadulto y adulto en poblaciones de *Lombricus terrestris*.

De modo que para el estadio de cocon se tiene que:

$$\left[\frac{2cocnes}{mes} \right] = \left[\frac{2cocones}{4semanas} \right] = 0.5 \frac{cocones}{semanas} \quad \text{O sea que} \quad 1 \frac{cocon}{lombriz} * 0.5 \frac{cocones}{semanas}$$

La ultima expresión detalla en términos de sobrevivientes a 0.5, es decir por cada cocon puesto solo sobrevivirá media cápsula o capullo.

Por lo tanto, las probabilidades de supervivencia para las categorías correspondiente para el estadio de cocon son:

$$P_{x_{1-3}} = P_{x_1} \cdot P_{x_2} \cdot P_{x_3} \quad \text{Ec. 20}$$

$$0.5 = \text{sup erv1} * \text{sup erv2} * \text{sup erv3}$$

$$0.5 = (\text{sup ervivencias}_{1-3})^3$$

incluyendo las distribuciones de probabilidades tenemos

$$0.5 = 0.7 * 0.8 * 0.9 \quad \text{Ec.20a}$$

La distribución de estas probabilidades en las tres categorías que corresponden al estadio de cocon, manifiestan que la probabilidad de que sobrevivan en la primera categoría el capullo es de 0.7, lo que significa que el capullo todavía esta en estado de gel y por tanto su supervivencia no esta totalmente garantizada. De misma manera para las otras dos categorías restantes, solo que en estas las probabilidades son 0.8 (capullo diferenciado por su forma oval) y 0.9. Para el caso

de la penúltima probabilidad, el capullo estará listo para la eclosión, llegando a esta con una probabilidad del 0.9.

Estadío Juveniles

Para poder establecer las probabilidades de supervivencia en este estadio se consideró a la proporción de el mismo es decir 30 y de la probabilidad del estadío de subadultos (proporción 13). De esta manera se tomo a la primera proporción entre la segunda es decir:

$$\left[\frac{30}{13} \right]$$

De modo que este resultado fue distribuido con base en la edad, es decir a menor edad menor será la probabilidad de supervivencia que sé les proporcione a los sobrevivientes que inicien la categoría siguiente. Por lo tanto, la supervivencia para los sobrevivientes que se encuentren al inicio de la cuarta semana es 0.7 y 0.8, 0.9, 0.9, 0.91 para las demás semanas comprendidas en las lombrices juveniles, es decir la 6ª semana, 7ª semana 8ª semana. De manera que para esta ultima la probabilidad de que sobrevivan los individuos (hermafroditas) es de 0.91. Por lo tanto esta descripción puede comprenderse mejor con lo siguiente:

$$P_{x_{4-8}} = P_{x_4} \cdot P_{x_5} \cdot P_{x_6} \cdot P_{x_7} \cdot P_{x_8} \quad \text{Ec.21}$$

$$0.433 = 0.7 * 0.8 * 0.90 * 0.9 * 0.91$$

Para efectos de simulación (figura 5) tenemos que:

$$0.433 = \text{sup } erv4 * \text{sup } erv5 * \text{sup } erv6 * \text{sup } erv7 * \text{sup } erv8$$

$$0.433 = (\text{sup } ervivecias_{4-8})^5$$

Cabe señalar que estas probabilidades se distribuyeron basándose en una lógica de la edad.

Estadio de SubAdulto

Para poder distribuir a las proporciones de probabilidades de supervivencias en cada una de las categorías de este estadio se tomó a la proporción de los individuos de edad adulta entre la proporción de los individuos del estadio de subadultos, el resultado fue distribuido uniformemente para cada una de las probabilidades de supervivencias que comprenden a las edades de los subadultos.

$$\left[\frac{8}{13} = 0.6153 \right]$$

Simbólicamente

$$P_{x_{9-12}} = P_{x_9} \cdot P_{x_{10}} \cdot P_{x_{11}} \cdot P_{x_{12}} \quad \text{Ec. 22}$$

Numéricamente

$$0.6153 = 0.91 * 0.91 * 0.91 * 0.91$$

Para efectos de simulación tenemos conceptualmente (figura 5) que:

$$0.6153 = \text{sup } erv9 * \text{sup } erv10 * \text{sup } erv11 * \text{sup } erv12$$

Para implementar estas probabilidades de supervivencias se consideró que todos los individuos contenidos en estas edades sobreviven con 0.91 en cada una de las categorías que se incluyen en esta estructura de edades (Subadultas). Esto se hizo con la lógica de que los individuos tienen mayor edad y por tanto pueden sobrevivir con más probabilidad a cualquier evento catastrófico que se encuentre dentro del margen de resistencia biológica de los individuos.

Estadio Adulto

Para las lombrices adultas se consideró a los sobrevivientes con una probabilidad de supervivencia de 0.998, es decir $\left[\frac{1}{52 \cdot 16} = \frac{1}{183} = 0.0012 \right]$ por tanto, $1 - 0.0012 = 0.998$. Lo siguiente estima esta probabilidad de supervivencia, además del número de lombrices que llegan a la edad adulta.

0.5 ; Probabilidad de supervivencia para el estadio de cocon.

2 ; Tasa de eclosión (razón intraespecífica constante de crecimiento)

Por lo tanto:

$$\frac{0.5}{x^2} \leftarrow \text{Da origen a una lombriz recién nacida; la probabilidad de que sobreviva dependerá de la supervivencia}$$

De esta manera si son 7 lombr

$$\frac{x^1}{7} ; \frac{x^{0.43}}{7} ; \frac{x^{3.01}}{1.85} ; \frac{x^{1.85}}{1.8463}$$

3.01 lombrices

De donde 0.998 es la esperanza de vida (e_x) de la especie (16 años). De aquí que de 7 lombrices sobrevivan 1.85 lombrices.

A continuación se describen a las ecuaciones del modelo discreto de la población con base en la estructura de edades que comprende a los estadios de cocon, juveniles, SubAdulta y adulta

Estadíos representados por simbologías ecológicas

Cocon

$$Lcocones_{n-1} = L1_{n-1} + L2_{n-1} + L3_{n-1} \quad \text{Ec. 23}$$

$Lcocones_{n-1}$; Es la población de cocones estructurales totales en unidades de, [cocones / semanas] definida por las tres categorías poblacionales de cocones.

Juvenil

$$L_{juvenil_{n-1}} = L4_{n-1} + L5_{n-1} + L6_{n-1} + L7_{n-1} + L8_{n-1} \quad \text{Ec. 24}$$

De donde $L_{juvenil_{n-1}}$ denota la población de juveniles estructurales totales en unidades de, $[lombrices / semanas]$ producidas por las poblaciones de lombrices que presentan cada una de las categorías de las lombrices juveniles.

SubAdulto

$$L_{subadulto_{n-1}} = L9_{n-1} + L10_{n-1} + L11_{n-1} + L12_{n-1} \quad \text{Ec. 25}$$

De donde:

$L_{subadulto}$; Es la población de subadultos estructurada funcionalmente por cuatro categorías que comprenden a estas edades (SubAdulto) en unidades de, $[lombrices / semanas]$ por tanto, el resultado final de las poblaciones estructurales constituyen a la población total de juveniles.

Adulto

$$L_{adulto_{n-1}} = L13_{n-1} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde

$L_{adulto_{n-1}}$; Es la población correspondiente a la categoría 13 de este estadio con unidades de, $[lombrices / semanas]$. Por lo tanto, la población de lombrices que comprende a la categoría 13 definirá directamente a la población total de lombrices adultas. Con base en lo anterior podemos calcular a la población estructural total para los estadios de juvenil, subadulto y adulto. El resultado es como sigue.

$$L_{total_{n-1}} = L_{juvenil_{n-1}} + L_{subadulto_{n-1}} + L_{adulto_{n-1}} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde

$L_{total_{n-1}}$; Es la población estructural total del estadio de lombrices en unidades de, $[lombrices / semanas]$.

Fracción poblacional

La población fraccionada se calculó partir de la población estructural total de las edades de los juvenil, subadultos y adultos sobre la población total estructural de cada uno de los estadios, es decir las edades de los individuos juveniles totales entre la suma de la suma de las edades del estadio de lombrices y así consecutivamente con la demás población total estructural de las edades de estadio de lombrices.

Resumen Matemático del Modelo

Siguiendo la misma lógica empleada por Johnson y Thornley (1983) para determinar el crecimiento vegetativo para un zacate, podemos describir al modelo como sigue:

El modelo tiene 13 variable de estados (categorías), las cuales son descritas con las siguientes ecuaciones diferenciales.

Cocon

$$\frac{dL1_{n-1}}{dt} = \beta_x - \delta_{x_1} \cdot L1_{n-1} - l_{x_1+1} \cdot L1_{n-1} \quad \text{Ec. 28}$$

$$\frac{dL2_{n-1}}{dt} = l_{x_1+1} \cdot L1_{n-1} - \delta_{x_2} \cdot L2_{n-1} - l_{x_2+1} \cdot L2_{n-1} \quad \text{Ec. 29 a}$$

$$\frac{dL3_{n-1}}{dt} = l_{x_2+1} \cdot L2_{n-1} - \delta_{x_3} \cdot L3_{n-1} - l_{x_3+1} \cdot L3_{n-1} \quad \text{Ec. 30b}$$

Juvenil

$$\frac{dL4_{n-1}}{dt} = l_{x_3+1} \cdot L3_{n-1} \cdot r_x - \delta_{x_4} \cdot L4_{n-1} - l_{x_4+1} \cdot L4_{n-1} \quad \text{Ec. 31 c}$$

$$\frac{dL5_{n-1}}{dt} = l_{x_4+1} \cdot L4_{n-1} - \delta_{x_5} \cdot L5_{n-1} - l_{x_5+1} \cdot L5_{n-1} \quad \text{Ec. 32 d}$$

$$\frac{dL6_{n-1}}{dt} = l_{x_5+1} \cdot L5_{n-1} - \delta_{x_6} \cdot L6_{n-1} - l_{x_6+1} \cdot L6_{n-1} \quad \text{Ec. 33 e}$$

$$\frac{dL7_{n-1}}{dt} = l_{x_6+1} \cdot L6_{n-1} - \delta_{x_7} \cdot L7_{n-1} - l_{x_7+1} \cdot L7_{n-1} \quad \text{Ec. 34 f}$$

$$\frac{dL8_{n-1}}{dt} = l_{x_7+1} \cdot L7_{n-1} - \delta_{x_8} \cdot L8_{n-1} - l_{x_8+1} \cdot L8_{n-1} \quad \text{Ec. 35 g}$$

SubAdulto

$$\frac{dL9_{n-1}}{dt} = l_{x_8+1} \cdot L8_{n-1} - \delta_{x_9} \cdot L9_{n-1} - l_{x_9+1} \cdot L9_{n-1} \quad \text{Ec. 36 h}$$

$$\frac{dL10_{n-1}}{dt} = l_{x_9+1} \cdot L9_{n-1} - \delta_{x_{10}} \cdot L10_{n-1} - l_{x_{10}+1} \cdot L10_{n-1} \quad \text{Ec. 37 i}$$

$$\frac{dL11_{n-1}}{dt} = l_{x_{10}+1} \cdot L10_{n-1} - \delta_{x_{11}} \cdot L11_{n-1} - l_{x_{11}+1} \cdot L11_{n-1} \quad \text{Ec. 38 j}$$

$$\frac{dL12_{n-1}}{dt} = l_{x_{11}+1} \cdot L11_{n-1} - \delta_{x_{12}} \cdot L12_{n-1} - l_{x_{12}+1} \cdot L12_{n-1} \quad \text{Ec. 39 k}$$

Adulto

$$\frac{dL13_{n-1}}{dt} = l_{x_{13}+1} \cdot L12_{n-1} - \delta_{x_{13}} \cdot L13_{n-1} \quad \text{Ec.40 l}$$

Donde:

β_x es calculada por la ecuación (Ec.17), l_{x_n+1} por la ecuación (Ec.18) y δ_{x_n} por la ecuación (Ec.19).

Donde “n” a excepción de, Lx_{n-1} indica solamente la categoría a la cual corresponden los decesos o sobrevivientes y, r_x denota la razón intraespecífica constante de crecimiento (Ec.31c). Por lo tanto, δ_{x_n} y l_{x_n+1} son razones de cambio

de decesos y sobrevivientes para cada una de las categorías que conforman a los estadios. De este modo δ_{x_n} refleja la mortalidad que se presenta en un intervalo de tiempo para cada una de las categorías (1 – 13) y l_{x_n+1} proporciona los sobrevivientes que se encuentran al inicio de la clase o categoría siguiente.

Por otro lado, $L1_{n-1}, L2_{n-1}, L3_{n-1} \dots L13_{n-1}$ representan la dinámica poblacional por estructura de edades. Esto puede verse con mas detalle en la Figura 3 y 4.

Estas figuras representa de manera conceptual al modelo dinámico de simulación con sus dos diferentes estadios definidos por cada una de las categorías que conforman al modelo. Esto puede mostrarse mas claramente en la figura 4.

Manejo de Modelo

Mediante los programas editores del modelo (vensim ver. 5.1b y Stella ver 2.0) se generó el archivo MODSEPIES para cada programa. Este archivo contiene el modelo por estructura de edades (cocones, juveniles, subadultos y adultos) con sus respectivos parámetros como población inicial, fecundidad, probabilidades de supervivencias y tasas instantáneas de crecimiento. Parámetros constantes que al ser cambiados modifican la estructura poblacional. Para efectos de simulación se realizaron las siguientes corridas, los cuales son como siguen:

Primera corrida

Población inicial = 2 lombrices maduras sexualmente (13 semanas)

Fecundidad = 1

Probabilidad de supervivencia = 1

Tasa instantánea de crecimiento = 2

Tiempo = 0 – 52 semanas

Es de particular importancia comentar que se puede hacer una serie de corridas con tan solo modificar la tasa instantánea de crecimiento como lo señalan las tablas de Ferruzzi en el apéndice 2

Una segunda corrida

Población inicial = 2 lombrices maduras sexualmente (13 semanas)

Proporciones de probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1977) en cada una de las categorías de los estadios correspondientes.

Tasa instantánea de crecimiento = 21 recién nacidos

RESULTADOS

El modelo dinámico de simulación para estimar el ciclo de vida de una población ideal de *Eisenia foetida* (lombriz de tierra roja californiana) permitió que se manejara el ciclo de vida ideal para la especie de lombriz roja californiana, a partir de parámetros constantes como población inicial, fecundidad, probabilidades de supervivencias y razón intraespecífica constante de crecimiento. Estos parámetros definen directamente a las variables de entradas tales como natalidad, mortalidad y sobrevivientes en cada una de las categorías correspondientes a cada estadio. De modo que las cuatros diferentes estadios son modificados a partir de estas variables de entrada y salida. Entonces para este fin el modelo permite observar los cambios en el sistema a partir de las variables de entradas y salidas.

Finalmente se exponen los resultados obtenidos por el modelo y los datos empíricos de aumento de una población de lombriz publicados por Ferruzzi (2001). Presentados en el Apéndice 2

Resultados del Estadio de Cocon

Primera Corrida

Las ecuaciones diferenciales que determinan a este estadio (Ec. 28, 29a, 30b) dependen directamente de la natalidad e indirectamente de la fecundidad, probabilidades de supervivencia y de los sobrevivientes maduros sexualmente (de edad 13). Este estadio bajo condiciones ideales no se ve afectado o bien no presenta cambios en las poblaciones de cocones, cuando la fecundidad y probabilidades de supervivencia para los sobrevivientes es del 100%. De este modo los cocones permanecen vivos desde la primera a la tercera semana, es decir hasta el final de este estadio.

El cuadro 12. Muestra el número de estructuras en el estadio de cocon, así como también para cada una de las semanas que comprende este estadio. En

términos generales tanto en el cuadro 12 como en la figura 5 se puede observar que para la simulación realizada en el periodo de 0 – 52 semanas con los parámetros de la primera corrida, las poblaciones de cocones sobreviven durante, la primera, segunda y tercera semana. Debido al tiempo de permanencia (3 semanas), este estadio presenta diferentes características en las edades, es decir los cocones de la primera semana están en estado de gel, los de la segunda semana presentan una forma ovoide con coloración café grisáceo y los de la tercera semana presentan formas más ovoides al igual que una coloración amarillo grisáceo, lo cual significa que estos últimos están listos para el fenómeno de la eclosión. Cabe señalar que esta descripción tiene el sustento de las publicaciones de Ferruzi (2001), Shield (1999), Edwards y Lofty (1977).

Cuadro 12. Aumento de la población en el estadio de cocon (con base en el modelo utilizado), así como también la población presente en cada una de las categorías durante las 52 semanas. Este aumento poblacional está parametrizado por las condiciones de la primera corrida.

Semanas	Cocon1	Cocon2	Cocon3	CoconesT
0	0	0	0	0
1	2	0	0	2
2	2	2	0	4
3	2	2	2	6
4	2	2	2	6
5	2	2	2	6
6	2	2	2	6
7	2	2	2	6
8	2	2	2	6
9	2	2	2	6
10	2	2	2	6
11	2	2	2	6
12	2	2	2	6
13	2	2	2	6
14	6	2	2	10
15	10	6	2	18
16	14	10	6	30
17	18	14	10	42
18	22	18	14	54
19	26	22	18	66
20	30	26	22	78

21	34	30	26	90
22	38	34	30	102
23	42	38	34	114
24	46	42	38	126
25	50	46	42	138
26	54	50	46	150
27	66	54	50	170
28	86	66	54	206
29	114	86	66	266
30	150	114	86	350
31	194	150	114	458
32	246	194	150	590
33	306	246	194	746
34	374	306	246	926
35	450	374	306	1,130.00
36	534	450	374	1,358.00
37	626	534	450	1,610.00
38	726	626	534	1,886.00
39	834	726	626	2,186.00
40	966	834	726	2,526.00
41	1,138.00	966	834	2,938.00
42	1,366.00	1,138.00	966	3,470.00
43	1,666.00	1,366.00	1,138.00	4,170.00
44	2,054.00	1,666.00	1,366.00	5,086.00
45	2,546.00	2,054.00	1,666.00	6,266.00
46	3,158.00	2,546.00	2,054.00	7,758.00
47	3,906.00	3,158.00	2,546.00	9,610.00
48	4,806.00	3,906.00	3,158.00	11,870.00
49	5,874.00	4,806.00	3,906.00	14,586.00
50	7,126.00	5,874.00	4,806.00	17,806.00
51	8,578.00	7,126.00	5,874.00	21,578.00
52	*10,246.00	8,578.00	7,126.00	25,950.00
53	12,178.00	*10,246.00	8,578.00	31,002.00
54	14,454.00	12,178.00	*10,246.00	36,878.00

El presente cuadro muestra a las poblaciones de cocones contenidas en cada una de las categorías que conforman al estadio. Se observa que las poblaciones de cocones presentes en una primera categoría son el resultado del apareamiento de dos lombrices maduras sexualmente. Se puede apreciar que el aumento poblacional comienza a partir de las 14 semanas. Esto es, por que los cocones de la 3ra semana eclosionaron, y los recién nacidos de estos se están reproduciendo (cabe señalar que las poblaciones de cocones

de una primera, segunda y tercera categoría están desplazadas por una semana), es decir 4 lombrices maduras sexualmente dan origen a cuatro cocones mas los dos de los padres son en total 6 cocones los que estarán en la 14 semana (en realidad son 13 semanas lo que hace que sean 14 es el desplazamiento), y así sucesivamente podemos mencionar para cada una de la semanas con desplazamiento de una semana en la simulación de 54 semanas. De esta manera, podemos resaltar que no existen cambios en la densidad de población de cada una de las categorías del estadio, es decir los mismos individuos contenidos en una primera categoría pasaran a una segunda y tercera con sus respectivos desplazamientos. Sin embargo, la diferencia es el tiempo de modo que a medida que avanzan van adquiriendo mas edad. De esta manera los cocones de una primera categoría tienen una semana de edad y las de una segunda tienen 2 semanas de edad y las de una tercera tienen 3 semanas

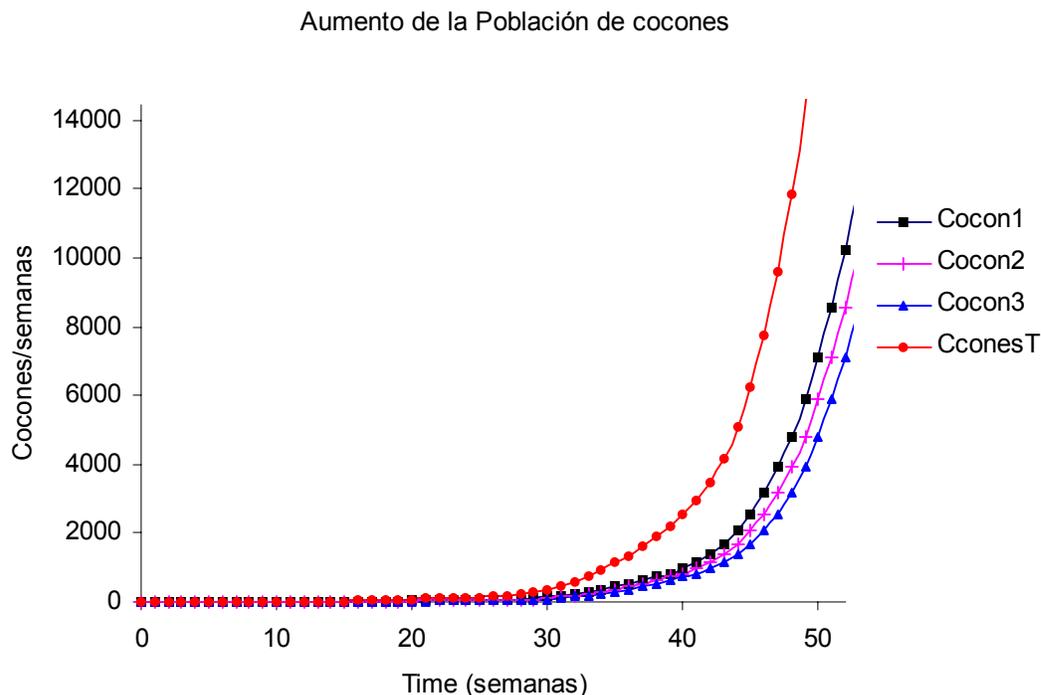


Figura 5. Aumento de una población ideal de cocones durante 52 semanas (Según el modelo construido).

La presente figura muestra que en un inicio (0 – 30 semanas) el crecimiento es constante en la población de cocones, según la figura el crecimiento empieza a partir de las 30 semanas con un crecimiento lento hasta las 45 semanas para ambas poblaciones (Cocon1, Cocon2 y Cocon3) después de este tiempo el crecimiento es extremadamente exponencial, por tanto las diferencias que se presentan durante las 52 semanas simuladas, se deben al desplazamiento de las poblaciones de cocones, es decir al final de las 52 semanas habrá 10246 cocones en cada una de las categorías (1 – 3) que diferirán en edades. Por lo tanto, haciendo énfasis en la suma total de cocones tenemos que para las 35 semanas simuladas la población alcanzada es de 2000 cocones mientras que para las 42 semanas la población es de 4000 cocones. Después de esto puede observarse que el aumento de la población se da en menos tiempo, es decir para la semana 44 y 45 la población acumulada es de 8000 a 10000 cocones y así sucesivamente como lo detallan la figura 5 y el cuadro 12.

Resultados del estadio Juvenil

Primera corrida

Las ecuaciones que determinan al estadio de juveniles (Ec. 31c, 32d, 33e, 34f y 35g) dependen directamente del número de cocones que han sobrevivido a la tercera categoría, de la tasa de eclosión (Tasa instantánea de crecimiento, “r” y de las probabilidades de supervivencia que contiene el estadio de juveniles. Por lo tanto, para condiciones ideales (supervivencia = 1) no hay cambios en la estructura poblacional (4 – 8 categorías) de los juveniles, es decir cuando las probabilidades de supervivencia son del 100%. De esta manera, los juveniles permanecen sin cambios en el intervalo de la 4^a - 8^a semana.

El cuadro 13 y la Figura 6 presentan las poblaciones de juveniles del modelo construido, comprendidas en cada una de las categorías (4 – 8) que conforman al estadio de juvenil, de modo que la primera categoría corresponde a los recién nacidos. Estos son el producto de los cocones sobrevivientes y de la tasa de

eclosión. Estos recién nacidos avanzan sin presentar cambios durante el intervalo de las categorías hasta alcanzar edades de 5 semanas de recién nacidos (a mediada que el tiempo pasa, los individuos experimentan mayor edad). Estos recién nacidos se encuentran también de manera de bloques en el Apéndice 2 (cuadro 1).

Cuadro 13. Aumento de la población de lombrices de acuerdo al estadio juvenil con sus respectivas categorías de RecienN, juveniles1, juveniles2, juveniles3 y juveniles4. Datos del el modelo construido, cabe puntualizar que estos valores corresponden a los datos empíricos de Ferruzzi con la única diferencia de que el modelo los estima de manera acumulada (sin bloques) y ferruzzi los estima por bloques (Apéndice 2).

Semanas	RecienN	Juveniles1	Juveniles2	Juveniles3	Juveniles4	JuvenilesT
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	4
5	4	4	0	0	0	8
6	4	4	4	0	0	12
7	4	4	4	4	0	16
8	4	4	4	4	4	20
9	4	4	4	4	4	20
10	4	4	4	4	4	20
11	4	4	4	4	4	20
12	4	4	4	4	4	20
13	4	4	4	4	4	20
14	4	4	4	4	4	20
15	4	4	4	4	4	20
16	4	4	4	4	4	20
17	12	4	4	4	4	28
18	20	12	4	4	4	44
19	28	20	12	4	4	68
20	36	28	20	12	4	100
21	44	36	28	20	12	140
22	52	44	36	28	20	180
23	60	52	44	36	28	220
24	68	60	52	44	36	260
25	76	68	60	52	44	300
26	84	76	68	60	52	340
27	92	84	76	68	60	380
28	100	92	84	76	68	420
29	108	100	92	84	76	460
30	132	108	100	92	84	516
31	172	132	108	100	92	604

32	228	172	132	108	100	740
33	300	228	172	132	108	940
34	388	300	228	172	132	1,220.00
35	492	388	300	228	172	1,580.00
36	612	492	388	300	228	2,020.00
37	748	612	492	388	300	2,540.00
38	900	748	612	492	388	3,140.00
39	1,068.00	900	748	612	492	3,820.00
40	1,252.00	1,068.00	900	748	612	4,580.00
41	1,452.00	1,252.00	1,068.00	900	748	5,420.00
42	1,668.00	1,452.00	1,252.00	1,068.00	900	6,340.00
43	1,932.00	1,668.00	1,452.00	1,252.00	1,068.00	7,372.00
44	2,276.00	1,932.00	1,668.00	1,452.00	1,252.00	8,580.00
45	2,732.00	2,276.00	1,932.00	1,668.00	1,452.00	10,060.00
46	3,332.00	2,732.00	2,276.00	1,932.00	1,668.00	11,940.00
47	4,108.00	3,332.00	2,732.00	2,276.00	1,932.00	14,380.00
48	5,092.00	4,108.00	3,332.00	2,732.00	2,276.00	17,540.00
49	6,316.00	5,092.00	4,108.00	3,332.00	2,732.00	21,580.00
50	7,812.00	6,316.00	5,092.00	4,108.00	3,332.00	26,660.00
51	9,612.00	7,812.00	6,316.00	5,092.00	4,108.00	32,940.00
52	*11,748.00	9,612.00	7,812.00	6,316.00	5,092.00	40,580.00
53	14,252.00	*11,748.00	9,612.00	7,812.00	6,316.00	49,740.00
54	17,156.00	14,252.00	*11,748.00	9,612.00	7,812.00	60,580.00

En el presente cuadro se observa a la evolución poblacional que presenta el estadio de juvenil con desplazamientos de 4 semanas en cada una de las categorías de RecienN, juvenil1, juvenil2, juvenil3 y juvenil4. En este desplazamiento categóricos se observa que durante las primeras 13 semanas simuladas no hay cambios en la densidad poblacional, esto se debe a que ninguna de las poblaciones comprendidas en este tiempo hay llegado todavía a la madures sexual. Si embargo, los cambios comienzan a presentarse a partir de la 17 semanas simuladas, estos cambios son; por que a partir de las 17 semanas las poblaciones comienzan a alcanzar la madures sexual y por tanto las poblaciones comienzan a reproducirse hasta las 52 semanas simuladas. Mientras por otro lado se observa a la población total de juveniles, es decir la suma de la 5 categorías (RecienN, juvenil1, juvenil2, juvenil3 y juvenil4).

Aumento de la población Lombrícola por edades

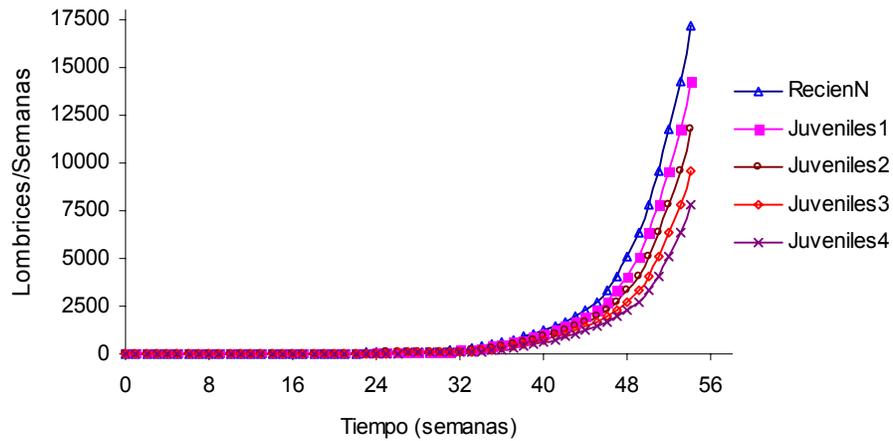


Figura 6. Aumento de una población ideal de lombrices según el modelo construido durante 52 semanas.

Esta figura muestra un crecimiento exponencial con un desplazamiento de 4 semanas para cada una de las categorías que comprenden al estadio de juvenil.

Aumento de la Población Lombrícola Total

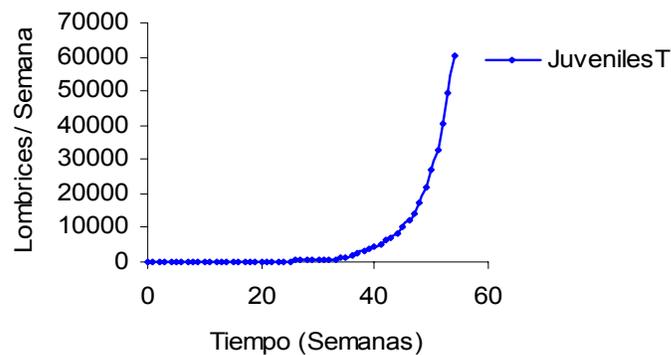


Figura 7. Aumento de la población ideal total de las edades juveniles con sus respectivos 4 desplazamientos.

Esta figura describe de forma acumulativa las poblacionales del estadio de juvenil, es decir el crecimiento poblacional empieza a diferenciarse a partir de la semana 19, lo que significa que la población empieza a duplicarse después de este tiempo, por lo que puede apreciarse que a menor tiempo mayor es la población alcanzada.

Esto es importante porque tanto los padres como la descendencia están reproduciéndose continuamente a través del tiempo del, cual son dependientes para alcanzar su madurez sexual, y así consecutivamente se va repitiendo para cada generación este fenómeno (Aumento Poblacional).

Resultados del Estadío Subadulto

Primera corrida

Las poblaciones de este estadio son determinadas por los individuos que sobrevivieron a una última categoría del estadio de juvenil. Estos individuos al llegar a estadio de subadulto tienen edades de 6 – 8 semanas (tiempo de permanencia), estas edades se van presentando conforme van llegando al estadio.

Cuadro 14. Aumento de la población de lombrices en el estadio subadulto con sus respectivas categorías de subadulto1, subadulto2, subadulto3 y subadulto4. Datos del el modelo construido, cabe puntualizar que estos valores corresponden a los datos empíricos de Ferruzzi con la única diferencia de que el modelo los estima de manera acumulada (sin bloques) y ferruzzi los estima por bloques (Apéndice 2).

semanas	SubAdulto1	SubAdulto2	SubAdulto3	SubAdulto4	SubAdultosTotales
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	4	0	0	0	4
10	4	4	0	0	8
11	4	4	4	0	12
12	4	4	4	4	16
13	4	4	4	4	16
14	4	4	4	4	16
15	4	4	4	4	16

16	4	4	4	4	16
17	4	4	4	4	16
18	4	4	4	4	16
19	4	4	4	4	16
20	4	4	4	4	16
21	4	4	4	4	16
22	12	4	4	4	24
23	20	12	4	4	40
24	28	20	12	4	64
25	36	28	20	12	96
26	44	36	28	20	128
27	52	44	36	28	160
28	60	52	44	36	192
29	68	60	52	44	224
30	76	68	60	52	256
31	84	76	68	60	288
32	92	84	76	68	320
33	100	92	84	76	352
34	108	100	92	84	384
35	132	108	100	92	432
36	172	132	108	100	512
37	228	172	132	108	640
38	300	228	172	132	832
39	388	300	228	172	1088
40	492	388	300	228	1408
41	612	492	388	300	1792
42	748	612	492	388	2240
43	900	748	612	492	2752
44	1068	900	748	612	3328
45	1252	1068	900	748	3968
46	1452	1252	1068	900	4672
47	1668	1452	1252	1068	5440
48	1932	1668	1452	1252	6304
49	2276	1932	1668	1452	7328
50	2732	2276	1932	1668	8608
51	3332	2732	2276	1932	10272
52	*4108	3332	2732	2276	12448
53	5092	*4108	3332	2732	15264
54	6316	5092	*4108	3332	18848

El presente cuadro muestra que en las categorías de subadulto, subadulto2, subadulto3 y subadulto4 no hay cambios en la densidad poblacional durante los desplazamientos de las categorías comprendidas durante 9 – 21 semanas simuladas. Si embargo, los cambios empiezan a observarse después de las 21

semanas hasta las 52 semanas. Esto se debe a que los descendientes (los 4) empiezan a reproducirse, de modo de ejemplo podemos ver la descendencia presente en la 9ª se reprodujo ya a las 22 semanas, porque para este entonces es madura sexualmente (13 semanas), es decir la primera descendencia mas los padres son multiplicados por la tasa instantánea de crecimiento, así consecutivamente podemos mencionar para las demás semanas simuladas (23 – 52). Sin embargo, las diferencias que podemos ver aquí son que las poblaciones presentes en las categorías difieren en edades que van desde 9 – 12 semanas. Por otro lado se aprecia a la población total de las 4 categorías que comprenden al estadios de subadulto ($\text{subadulto1} + \text{subadulto2} + \text{subadulto3} + \text{subadulto4} = \text{población total de subadulto}$).

Resultados del Estadío Adulto

Primera Corrida

La ecuación diferencial que determina al estadio de adulto (Ec. 40 I) depende directamente del número de sobrevivientes de la ultima categoría (subadulto4) y de la población inicial. La figura 9 muestra el aumento de la población de lombrices en el estadio adulto. Según el modelo construido.

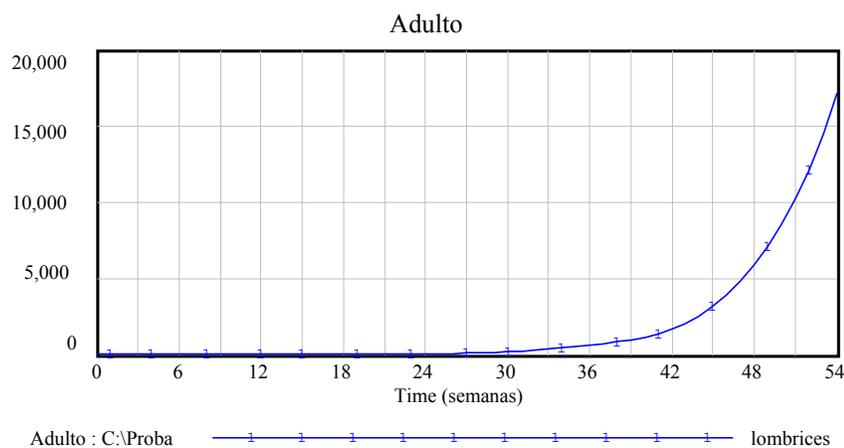


Figura 8. Aumento poblacional de lombrices adultas (13 semanas de edad), según el modelo construido.

En la presente figura se observa que durante las primeras 13 semanas no hay cambios en la población inicial (2) esto se debe a que ninguna de sus generaciones en este tiempo (0 – 12 semanas) ha alcanzado su madures sexual. Sin embargo, al llegar a las 13 semanas simuladas comienzan a haber cambios en la densidad poblacional, esto se debe a que sus descendientes están llegando consecutivamente a la madures sexual. Por lo tanto, la figura 8 describe un crecimiento constante durante las 0 – 20 semanas después de este tiempo comienza el aumento poblacional hasta llegar a las 52 semanas simuladas.

A continuación presentamos en la figura 9 de manera resumida a las poblaciones de cocones totales, juveniles totales, subadultos totales y adultos totales así como también la población total de estos. Mientras que la figura 9 denota a la fracción poblacional.

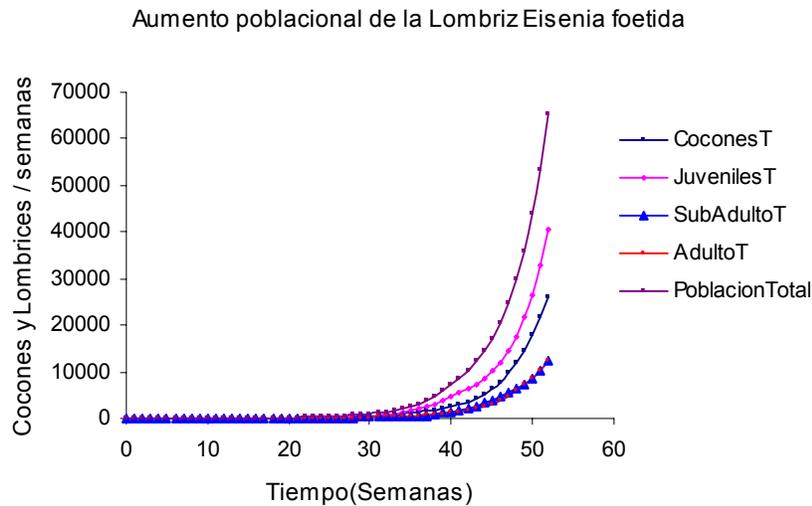


Figura 9. Crecimiento exponencial de las poblaciones, en la estructura de edad tanto de cocones como de lombrices.

La presente figura cumple con las con lo que señalan los textos de ecología de poblaciones (En poblaciones estructuradas por edades predominan en números los individuos jóvenes o juveniles, mientras que los subadultos y adultos se encuentran en mayor proporción por ejemplo las proporciones publicadas por Edwards y Lofty en 1978). De esta manera, bajo condiciones ideales 25960 cocones dan origen a 40580 juveniles totales y estos a su vez dan lugar a 24448

subadultos a su vez estos son los causantes del resultado de los adultos (11178), si consideramos como términos finales a estas cantidades. Es de particular relevancia señalar que estos cambios se deben también al desplazamiento que existe a lo largo de la estructura de edades.

Por otro lado, señalando a la población total podemos indicar que los cambios en la población comienzan a diferenciarse después de las 17 semanas; posteriormente observamos que las generaciones se están reproduciendo a menor tiempo, es decir el tiempo es valioso después de tener la madurez sexual (tenemos que reproducirnos porque la vida se acaba, es decir somos gobernado por el tiempo).

Fracción de población (primera corrida)

La siguiente figura (10) presenta la fracción poblacional de acuerdo a la estructura de edad de la especie. El decaimiento que se presenta en los adultos es porque en inicio el número de individuos adultos y población total eran casi iguales solo con algunas diferencias de decimales, pero conforme fue transcurriendo el tiempo estos (Adultos) esto fue porque los juveniles y subadultos se sobrepusieron a las poblaciones adultas alejándose de los valores de la población total presentando escasas variaciones en sus poblaciones. Cuando esto paso la población total también ya no presento cambios, y fue el momento (26 semanas) en que la población de adultos se equilibró. Por ejemplo, la figura 10 indica que para una 5^a semana el valor reflejado 2.01, de modo que este valor es dividido entre la población total (10.7). Entonces, la razón de decaimiento para este tiempo será 0.1878. Sin embargo, para el caso de cocones, juveniles y subadultos el proceso numérico es inverso, es decir en inicio los valores de juveniles son muy distantes a los valores de la población total, pero la densidad de estos sigue aumentando de tal manera que no se alejan tanto de la población total de este modo el equilibrio es notado cuando la población tanto individuales como totales ya no presentan cambios.

Por otra parte la figura 10 describe el equilibrio total de cocones, juveniles y subadultos. La Figura describe un decaimiento muy pronunciado en los adultos esto se debe a que la población total es gobernada por las poblaciones de cocones, juveniles y subadultos, de modo que a mayor densidad de estos mayor será el decaimiento. Por otro lado, podemos apreciar que la población de cocones gobierna al equilibrio presentado en juveniles y subadultos, es decir a mayor numero de cocones mayor será la población de juveniles y subadultos. De manera que cuando la población de cocones comience a equilibrarse, también las poblaciones de juveniles y subadultos lo harán. Por lo tanto, el equilibrio de estas estará en función de la cantidad de cocones y estos a su vez del numero poblacional de adultos.

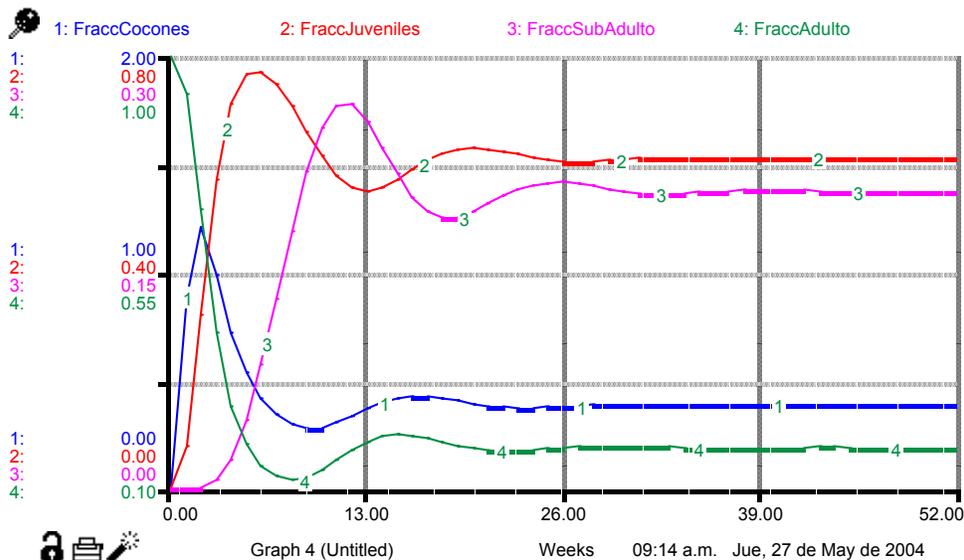


Figura 10. Fracción población en la estructura de edades de la especie *Eisenia foetida*.

Resultados de la segunda corrida

Estadio de Cocon

La siguiente Figura (11) presenta una variación en el número de cocones que comprende este estadio desde la primera hasta la tercera semana. Esto se debe por que influyen las proporciones de supervivencias (Ec. 20a) en cada uno de los intervalos de los sobrevivientes de cada categoría que conforman al modelo (1 – 13 categorías).

En términos particulares para este estadio se puede apreciar que durante las 54 semanas (fecundidad constante, tasa instantánea de crecimiento = 21), el número de cocones durante la primera, segunda y tercera semana presentan cambios en la población de cocones. Estos cambios son el resultado de la influencia de las probabilidades de supervivencias (0.7, 0.8, 0.9) en los intervalos que comprenden a los sobrevivientes (cocones) de este estadio. Cabe puntualizar también que estos cambios son el producto directamente de la natalidad e indirectamente de la fecundidad y de los sobrevivientes maduros sexualmente y a su vez estos son el resultado de la probabilidad de supervivencias o esperanza de vida de la especie. Tomando en cuenta esto, podemos observar que la probabilidad de que sobrevivan las poblaciones de cocones a la categoría siguiente (segunda categoría “cocon2”) durante las 54 semanas es 0.7. De modo que la probabilidad de que sobrevivan los individuos comprendidos en la primera categoría a la segunda es muy baja (0.7), es decir la probabilidad de que sobreviva la población de cocon en estado de gel es 0.7. Esto se debe a que el cocon no está totalmente preparado para responder a los factores bióticos y abióticos (puede ser depredado, contaminado y dañado por efectos ambientales).

Por otra parte la probabilidad 0.8 influye directamente en los sobrevivientes de segunda categoría, es decir la probabilidad de que sobrevivan los individuos de la segunda categoría es mayor a la primera. De esta manera estamos diciendo que los cocones de coloración café grisáceo o sea ya más formados, es mayor la probabilidad de que sobrevivan a la siguiente categoría (tercera “cocon3”), por el

simple hecho de que ya han experimentado una forma de adaptación mayor (0.8) y por consiguiente tienen mayor edad, es decir han pasado de una primera categoría a una segunda y por lo tanto hay mas probabilidad de que sobrevivan en la siguiente categoría (cocon3). Sin embargo, para los factores abióticos (ambientales) no existe distinción alguna. Sin embargo, las poblaciones deben especializarse para contrarrestarlos o bien para que puedan seguir viviendo en el oscilante universo.

De esta manera la probabilidad de que sobrevivan el número de cocones de la tercera categoría dependerá de la probabilidad de 0.9, es decir la probabilidad de que sobrevivan las poblaciones de cocones en esta categoría es mucho mayor a las anteriores, por el hecho de que los cocones presentan mas protección (capsula) y debido a esto pueden soportar mas a los efectos de los factores ambientales. Por tanto, para este entonces (3 semanas) los cocones con una coloración amarillo grisáceo estará experimentando el fenómeno eclosional. Por lo tanto, los cambios presentes en las poblaciones pueden observarse en el cuadro 15.

Cuadro 15. Aumento de la población de cocones según el modelo construido y con base en las probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1978).

Semanas	Cocon1	Cocon2	Cocon3	Cocones
0	0	0	0	0
1	1.98	0	0	1.98
2	1.95	1.38	0	3.34
3	1.93	1.37	1.11	4.4
4	1.91	1.35	1.09	4.35
5	1.88	1.33	1.08	4.3
6	1.86	1.32	1.07	4.25
7	1.84	1.3	1.05	4.19
8	1.82	1.29	1.04	4.14
9	1.79	1.27	1.03	4.09
10	1.77	1.26	1.02	4.05
11	1.75	1.24	1	4
12	1.73	1.23	0.99	3.95
13	1.71	1.21	0.98	3.9
14	7.54	1.2	0.97	9.7
15	13.23	5.28	0.96	19.46
16	18.78	9.26	4.22	32.26
17	24.19	13.14	7.41	44.74

18	29.48	16.93	10.51	56.92
19	34.63	20.63	13.55	68.81
20	39.65	24.24	16.51	80.4
21	44.55	27.76	19.39	91.7
22	49.33	31.19	22.21	102.72
23	53.98	34.53	24.95	113.46
24	58.52	37.79	27.62	123.93
25	62.94	40.96	30.23	134.13
26	67.24	44.06	32.77	144.07
27	88.75	47.07	35.24	171.06
28	126.83	62.12	37.66	226.61
29	180.89	88.78	49.7	319.37
30	250.33	126.62	71.03	447.97
31	334.57	175.23	101.3	611.09
32	433.05	234.2	140.18	807.43
33	545.22	303.13	187.36	1,035.71
34	670.55	381.66	242.51	1,294.71
35	808.51	469.39	305.32	1,583.22
36	958.59	565.96	375.51	1,900.06
37	1,120.30	671.02	452.77	2,244.09
38	1,293.15	784.21	536.81	2,614.18
39	1,476.67	905.21	627.37	3,009.24
40	1,721.64	1,033.67	724.16	3,479.47
41	2,076.39	1,205.15	826.93	4,108.47
42	2,586.90	1,453.48	964.12	5,004.49
43	3,296.81	1,810.83	1,162.78	6,270.42
44	4,247.56	2,307.77	1,448.66	8,003.99
45	5,478.40	2,973.29	1,846.21	10,297.90
46	7,026.50	3,834.88	2,378.63	13,240.01
47	8,926.99	4,918.55	3,067.90	16,913.44
48	11,213.03	6,248.89	3,934.84	21,396.76
49	13,915.88	7,849.12	4,999.11	26,764.12
50	17,064.95	9,741.12	6,279.30	33,085.36
51	20,687.86	11,945.47	7,792.89	40,426.22
52	24,810.49	14,481.50	9,556.37	48,848.36
53	29,608.75	17,367.34	11,585.20	58,561.30
54	35,399.50	20,726.13	13,893.88	70,019.51

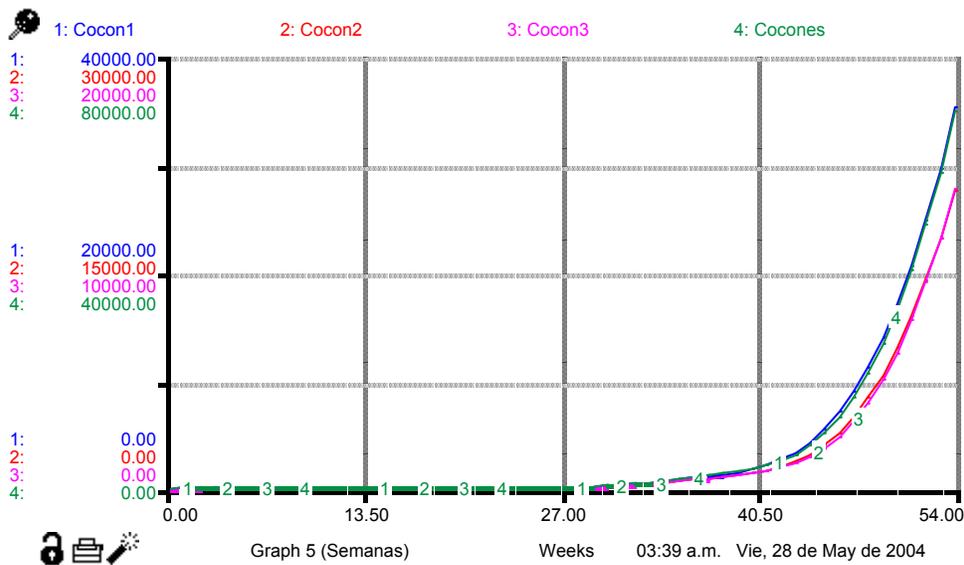


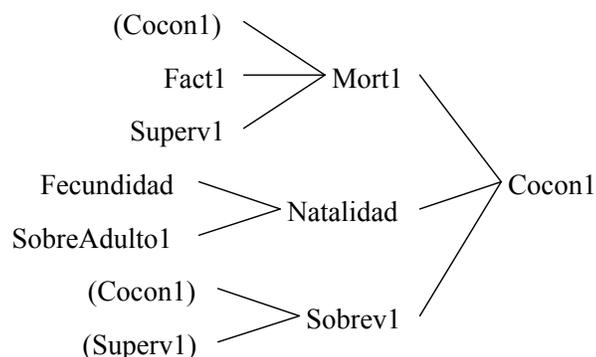
Figura 11. Aumento de la población de cocones con base en el modelo construido e incluyendo las probabilidades de supervivencias publicadas por Edwards y Lofty (1978), para cada una de las categorías que comprende el estadio.

La presente figura 11 al igual que el cuadro 12 muestra un crecimiento de las poblaciones de cocones en cada una de las categorías que comprende este estadio, según esta figura el aumento de la población empieza a diferenciarse a partir de las 27 semanas hasta llegar a las 54 semanas con un crecimiento muy parejo en las poblaciones contenidas en la categoría dos y tres. Sin embargo, las poblaciones de la primera categoría presentan un crecimiento exponencial mayor a las dos categorías posteriores. Esto se debe a que las poblaciones contenidas en la edad adulta tienen una probabilidad de supervivencia de 0.998. De modo que para la primera categoría de cocones en una primera semana será 1.98 y este a su vez, al ser multiplicado por la probabilidad de supervivencias (0.7), el valor correspondiente a la probabilidad de sobrevivencia de esta población en la siguiente categoría (cocon2) será 1.38; de aquí que se noten esas diferencias en la figura 11. Entonces, para una segunda categoría (cocon2) los individuos serán nuevamente multiplicados por su correspondiente probabilidad de supervivencia (0.8), obteniendo con esta la población que formará parte de la tercer categoría, es decir 1.38×0.8 será igual a 1.104 para una primera semana. Posteriormente estos

son multiplicados por 0.9 (la probabilidad de que sobrevivan es mayor). Finalmente los individuos que sobrevivan en el intervalo de la tercera categoría pasaran pasarán al siguiente estadio (juvenil), estarán listos para el fenómeno de la eclosión y cuando esto este sucediendo los individuos estarán formando parte del estadio de juvenil, con base en esto se aprecia tanto en el cuadro 15 como en la figura 11 que a pesar de tener una probabilidad de supervivencia muy baja (0.7) para los sobrevivientes de una primera categoría la población es mayor a las posteriores categorías que cuentan con probabilidades de supervivencia mayor (0.8 y 0.9) y así consecutivamente podemos mencionar para cada unidad de tiempo durante la simulación (54 semanas), ver cuadro 15.

Efecto de la Mortalidad en el estadio Cocon (Probabilidades)

Para poder realizar este análisis hemos optado en apoyarnos en el diagrama causal para una primera categoría (cocon1). De acuerdo con esto podemos observar que las poblaciones de cocones presentes en la categoría están siendo afectados por diversos factores (mort1, natalidad y sobrev1) de los cuales dependen. Estos factores causan efectos tanto indirecto como directos en la población de cocones de una primera categoría, los cuales pueden detallarse en el siguiente diagrama.

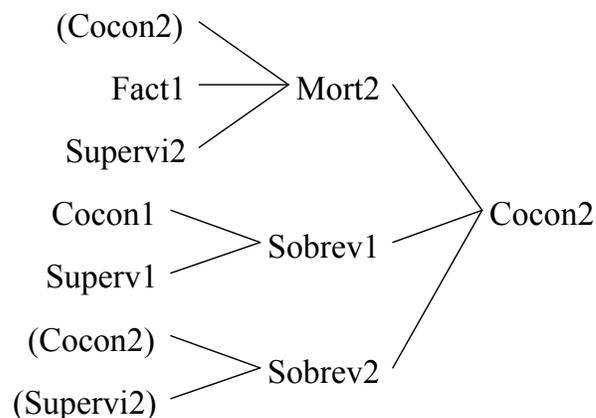


En este diagrama se presenta al flujo de nacimientos (natalidad) el cual depende de la fecundidad(constante) y de los sobrevivientes adultos (variable) de

13 semanas de edad. Por otro lado, también puede apreciarse a los flujos de mortalidad y de los sobrevivientes con sus respectivas dependencias.

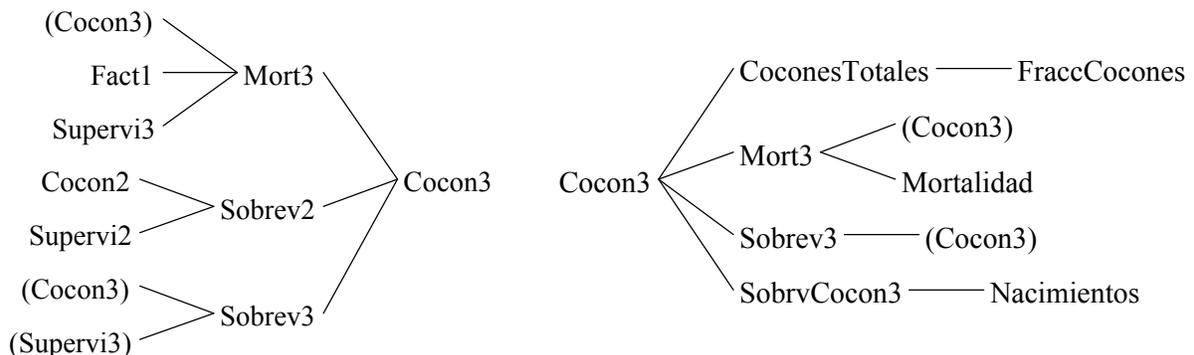
Analizando de manera mas especifica a los individuos que se encuentran en la primera categoría con los parámetros mencionados para una segunda corrida podemos describir lo siguiente.

Lo cocones incubados en una primera semana (categoría) experimentaran su primer tiempo de existencia, de modo que algunos se están muriendo y otros sobreviviendo, es en este instante en donde tenemos que echar un vistazo a la probabilidad de supervivencia (0.7). Esta probabilidad de supervivencia influye en la tasa de individuos muertos y en la de los sobrevivientes, de modo de ejemplo podemos apreciar que para una primera categoría mueren 0.5928 cocones / semanas y sobreviven 1.386 cocones / semanas y así sucesivamente podemos indicar para cada una de las semanas simuladas. Similarmente a esta descripción solo con la diferencia de edad y de la probabilidad de supervivencia podemos señalar lo siguiente: Lo individuos que sobrevivieron en el intervalo después de una primera categoría pasaran a una segunda, la probabilidad de que sobrevivan a esta dependerá de la probabilidad de supervivencia (0.8) de los cuales se presenta el siguiente árbol causal.



Aquí se muestran tres flujos o razones de cambios con sus respectivas dependencias. Estos flujos (Mort2, Sobrev1 y Sobrev2) afectan a la población de cocones en una segunda categoría, pero estos flujos también están siendo

afectados al mismo tiempo por las poblaciones de cocones de la categoría de la cual sé esta hablando, es decir la tasa de mortalidad como la tasa de sobrevivientes dependerá de la densidad de población, de lo contrario no habría mortalidad ni sobrevivientes. De manera de ejemplo podemos describir lo siguiente: Los individuos (1.386) que llegaron a la segunda categoría (cocon2) nuevamente son afectados por la probabilidad de supervivencia (0.8) ya que esta incide directamente en las tasas de mortalidad de sobrevivientes, es decir para una primera semana simulada la tasa de mortalidad y de sobrevivientes en la segunda categoría será 0.276 cocones / semanas y 1.11 cocones / semanas. De modo que estos sobrevivientes (1.11) llegaran a una tercera categoría, aquí habrá decesos y sobrevivientes y estos estarán en función de la supervivencia (0.9). De esta manera la razón de mortalidad es 0.111 cocones / semanas y la razón de los sobrevivientes es de 0.999 cocones /semanas. Los cuales pueden ser vistos con mas detalles en el siguiente diagrama.



En el diagrama de la izquierda estamos viendo como la supervivencia con sus respectivas diferencias (0.8 y 0.9) y las poblaciones de cocones de 2ª y 3ª categoría. Estos factores afectan a las razones de cambio (flujos) y estos a su vez afectan a las poblaciones de cocones de la 3ª categoría. Por otro lado, el diagrama de la derecha presenta el flujo (tasa) de nacimientos de los sobrevivientes que son denso dependientes de las poblaciones de cocones de la tercera categoría. Cabe enfatizar que estos (nacimientos) dependen de la velocidad a la cual se este llevando el rompimiento de la cápsula (cocon maduro). Entonces lo que le pase a las poblaciones de cocones repercutirá en las

poblaciones de lombrices. Esta descripción del efecto de la mortalidad del estadio cocon puede verse con mas detalle en el cuadro 16.

Cuadro 16. Razones de mortalidad en cada una de las categorías del estadio de cocon con base en las probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.

semanas	Mort1	Mort2	Mort3	MortalidadT
0	0	0	0	0
1	0.5928	0	0	0.5928
2	0.585686	0.27664	0	0.8623264
3	0.578658	0.27332	0.110656	0.9626344
4	0.571714	0.27004	0.109328	0.9510828
5	0.564854	0.2668	0.108016	0.9396698
6	0.558075	0.263598	0.10672	0.9283938
7	0.551378	0.260435	0.105439	0.917253
8	0.544762	0.25731	0.104174	0.906246
9	0.538225	0.254222	0.102924	0.895371
10	0.531766	0.251172	0.101689	0.8846265
11	0.525385	0.248157	0.100469	0.8740109
12	0.51908	0.24518	0.099263	0.8635228
13	0.512851	0.242237	0.0980719	0.8531606
14	2.26137	0.239331	0.096895	2.5975907
15	3.96784	1.0553	0.0957322	5.1188769
16	5.63304	1.85166	0.422122	7.906817
17	7.25769	2.62875	0.740664	10.627109
18	8.84255	3.38692	1.0515	13.280973
19	10.3883	4.12652	1.35477	15.869617
20	11.8957	4.84788	1.65061	18.39422
21	13.3655	5.55134	1.93915	20.855946
22	14.7982	6.23721	2.22054	23.255941
23	16.1946	6.90582	2.49488	25.595333
24	17.5554	7.55749	2.76233	27.875235
25	18.8812	8.19252	3.023	30.096727
26	20.1727	8.81123	3.27701	32.260895
27	26.6241	9.41391	3.52449	39.562546
28	38.0493	12.4246	3.76556	54.239502
29	54.2663	17.7564	4.96984	76.992531
30	75.0977	25.3243	7.10254	107.52451
31	100.37	35.0456	10.1297	145.54544
32	129.915	46.8394	14.0182	190.77245
33	163.567	60.6269	18.7358	242.92946
34	201.165	76.3312	24.2508	301.74722
35	242.553	93.8771	30.5325	366.96304
36	287.578	113.192	37.5509	438.3208
37	336.091	134.203	45.2767	515.57074
38	387.945	156.842	53.6813	598.46924
39	443.001	181.041	62.737	686.77869
40	516.491	206.734	72.4165	795.64111

41	622.918	241.029	82.6934	946.64038
42	776.069	290.695	96.4117	1163.1761
43	989.043	362.166	116.278	1467.4868
44	1274.27	461.553	144.866	1880.6866
45	1643.52	594.658	184.621	2422.7981
46	2107.95	766.975	237.863	3112.7881
47	2678.1	983.71	306.79	3968.5959
48	3363.91	1249.78	393.484	5007.1709
49	4174.76	1569.82	499.911	6244.5005
50	5119.48	1948.22	627.93	7695.6372
51	6206.36	2389.09	779.289	9374.7383
52	7443.15	2896.3	955.637	11295.084
53	8882.63	3473.47	1158.52	13514.614
54	10619.8	4145.22	1389.39	16154.462

Aumento de Mortalidad en poblaciones de *Eisenia foetida*

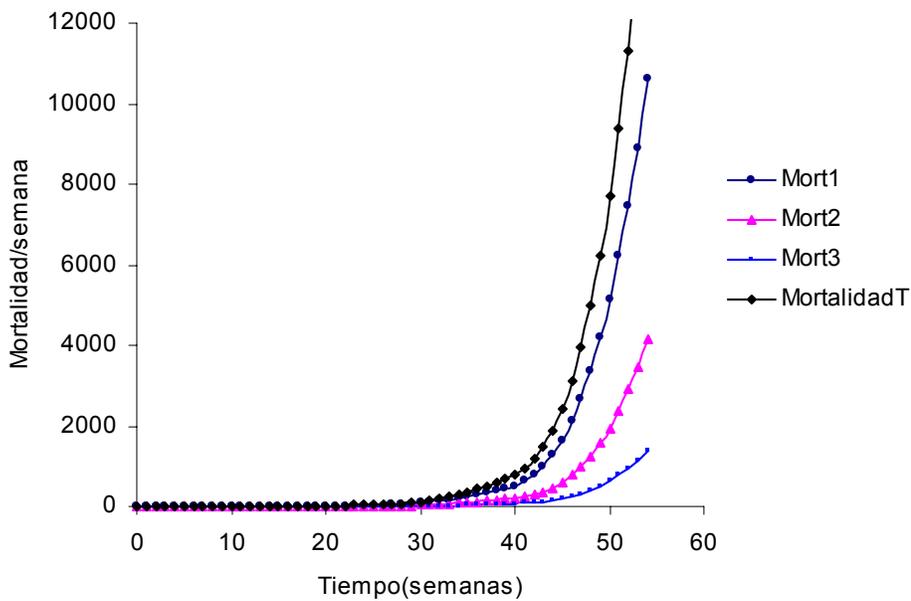


Figura 12. Aumento de las razones de mortalidad en las poblaciones de cocones en *Eisenia foetida*.

En la presente figura al igual que el cuadro 16 muestra al efecto de las probabilidades de supervivencias, es decir con una probabilidad de 0.9 se alcanza una mortalidad al final de la 54 semanas simuladas de 1800 cocones, mientras que para una supervivencia de 0.8 la mortalidad alcanzada al final de las 54 semanas es de 4145.22 cocones. Sin embargo, con la probabilidad de supervivencia de 0.7 la mortalidad al final de la 54 semanas es de 10619.8. Por lo

tanto, a mayor proporción de supervivencia menor será la mortalidad de lo contrario a menor supervivencia mayor mortalidad, ver detalles en el cuadro 16.

Cuadro 17. Aumento de las tasas de poblaciones cocones sobrevivientes en cada uno de los intervalos de las categorías que conforman a este estadío (cocon).

semanas	Sobrev1	Sobrev2	Sobrev3
0	0	0	0
1	1.3832	0	0
2	1.3666	1.10656	0
3	1.3502	1.09328	0.995904
4	1.334	1.08016	0.983953
5	1.31799	1.0672	0.972146
6	1.30218	1.05439	0.96048
7	1.28655	1.04174	0.948954
8	1.27111	1.02924	0.937567
9	1.25586	1.01689	0.926316
10	1.24079	1.00469	0.9152
11	1.2259	0.99263	0.904218
12	1.21119	0.980718	0.893367
13	1.19665	0.96895	0.882646
14	5.27652	0.957322	0.872055
15	9.2583	4.22121	0.86159
16	13.1438	7.40664	3.79909
17	16.9346	10.515	6.66597
18	20.6326	13.5477	9.4635
19	24.2394	16.5061	12.1929
20	27.7567	19.3915	14.8555
21	31.1861	22.2054	17.4524
22	34.5291	24.9488	19.9848
23	37.7875	27.6233	22.454
24	40.9626	30.23	24.861
25	44.0561	32.7701	27.207
26	47.0695	35.2449	29.4931
27	62.123	37.6556	31.7204
28	88.7818	49.6984	33.8901
29	126.621	71.0254	44.7286
30	175.228	101.297	63.9229
31	234.197	140.182	91.1674
32	303.135	187.358	126.164
33	381.656	242.508	168.622
34	469.386	305.325	218.257
35	565.958	375.508	274.792
36	671.016	452.766	337.958
37	784.212	536.813	407.49
38	905.206	627.37	483.132
39	1033.67	724.165	564.633
40	1205.15	826.934	651.748
41	1453.47	964.117	744.241
42	1810.83	1162.78	867.705

43	2307.77	1448.66	1046.5
44	2973.29	1846.21	1303.8
45	3834.88	2378.63	1661.59
46	4918.55	3067.9	2140.77
47	6248.89	3934.84	2761.11
48	7849.12	4999.11	3541.35
49	9741.12	6279.3	4499.2
50	11945.5	7792.89	5651.37
51	14481.5	9556.37	7013.6
52	17367.3	11585.2	8600.73
53	20726.1	13893.9	10426.7
54	24779.6	16580.9	12504.5

Poblaciones de sobrevivientes de *Eisenia foetida*

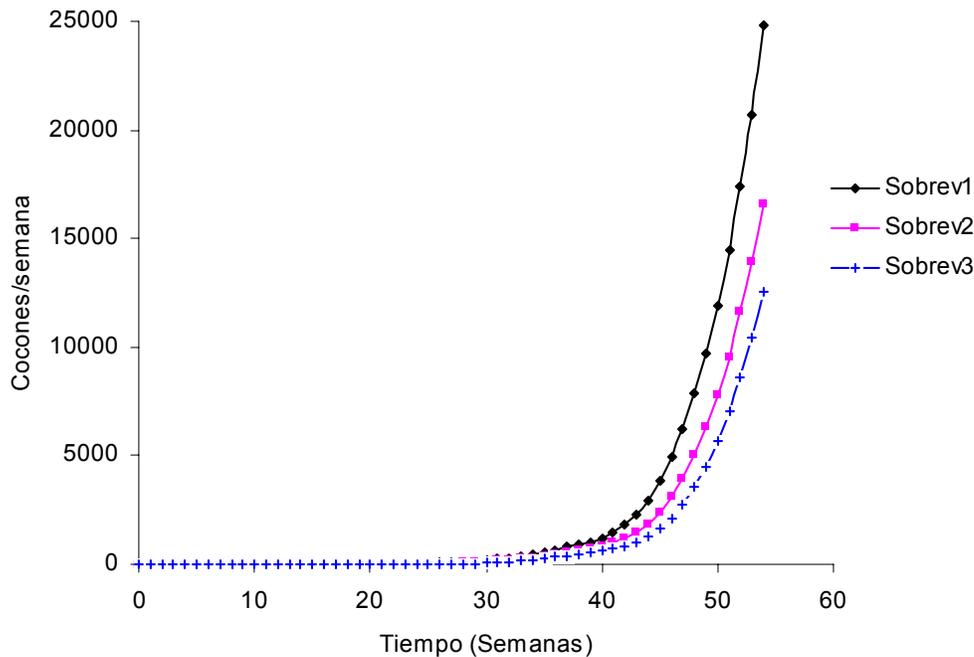


Figura 13. Aumento de la población de cocones sobrevivientes de *Eisenia foetida* según el modelo construido.

En presente figura 13 y en el cuadro 17, presentan a los sobrevivientes de la tercera categoría con mayor probabilidad de supervivencia (0.9). Pero recordemos que la fecundidad es constante, por lo tanto los cocones incubados en una primera categoría dependen directamente de los adultos sexualmente maduros y estos a su vez de su respectiva supervivencia (0.998). Entonces

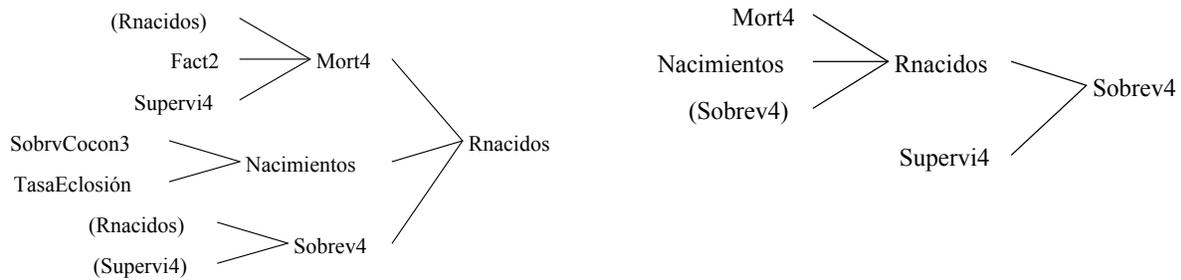
haciendo énfasis en la figura 13 podemos observar que la población de sobrevivientes es de (25000), por que la probabilidad de supervivencia de la cual dependieron fue de 0.998, pero al pasar estos a una segunda categoría la población disminuye a 18000 cocones al final de las 54 semanas, esto se debe al efecto que causa la probabilidad de supervivencia 0.7. Mientras que de los sobrevivientes de una segunda categoría solo se logran 14000 cocones, es decir a diferencia de la anterior sobreviven mas cocones, esto es consecuencia de la probabilidad de supervivencia de 0.8 “mayor” (de 18000 solo se mueren 4000 mientras que en la anterior se murieron 7000). Por lo tanto, los sobrevivientes a una tercera categoría serán mayores por el hecho de tener una probabilidad de supervivencia de 0.9, de manera que los sobrevivientes son 13000 cocones. Entonces, a menor supervivencia menor sobrevivientes (hay mas mortalidad) y a mayor supervivencia mayor sobrevivientes (menos mortalidad).

Estadío Juvenil

Segunda Corrida

Las poblaciones de este estadio están siendo afectadas por las probabilidades de supervivencias de 0.7, 0.8, 0.9, 0.9 y 0.91 en la estructura de edad que presenta la población. Las supervivencias están distribuidas con la lógica de mayor a menor; es decir la probabilidad de que sobrevivan los recién nacidos a una siguiente categoría (5) es de 0.7; la probabilidad de que estos avancen a una siguiente categoría (6) será de 0.8; los individuos que sobreviven con esta probabilidad pasaran a una consecutiva categoría (7) con la probabilidad de 0.9, de modo que la probabilidad de que estos sigan en una posterior categoría (8) será 0.9 y finalmente la probabilidad de que sobrevivan los individuos a una categoría de edad mayor será de 0.91. Observe como los recién nacidos a medida que tienen mas edad, la probabilidad de que sobrevivan en las diferentes categorías es mayor. Para facilitar la comprensión de esto haremos, un análisis con diagramas causales que comprende a las anteriores probabilidades de supervivencia (0.7,

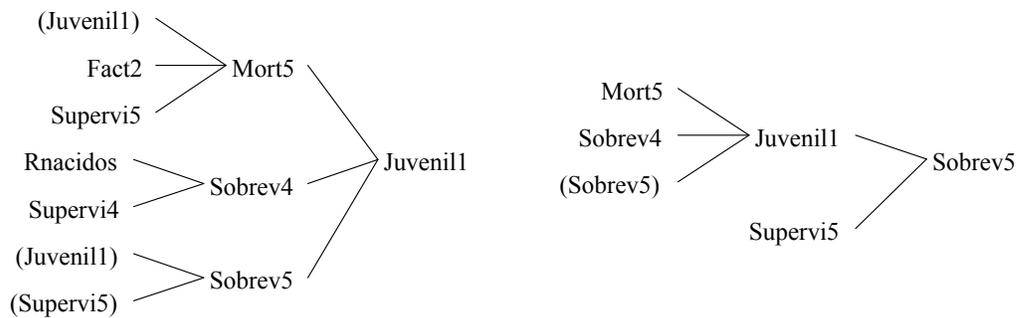
0.8, 0.9, 0.9 y 0.91). En los siguientes dos primeros diagramas se estudian a los recién nacidos comprendidos en la categoría 4, y la razón de sobrevivientes a una siguiente categoría (5).



El diagrama de la izquierda presenta a los factores que afectan a la población de lombrices recién nacidas comprendidas en una cuarta categoría. En este diagrama podemos observar que la población de recién nacidos depende de los flujos de nacimientos, mortalidad y de los sobrevivientes que pasaran a una siguiente categoría. También podemos apreciar que estos flujos a excepción de los nacimientos son afectados al mismo tiempo por las poblaciones de recién nacidos, de la probabilidad de supervivencia de 0.7 al igual que de la tasa de eclosión ($r = 21$ recién nacidos) y de las poblaciones de cocones que sobrevivieron y eclosionaron. Por lo tanto, observamos que el flujo de nacimientos no se ve afectado por las poblaciones de lombrices recién nacidos pero si es el causante de los cambios que le ocurren a las poblaciones recién nacidas, de esta manera el flujo de nacimientos viene de una fuente infinita de la que están naciendo las lombrices, de este modo lo que ocurra en la fuente ocurrirá en las poblaciones de recién nacidos, es decir si la fuente se acaba no habrá ni recién nacidos ni sobrevivientes.

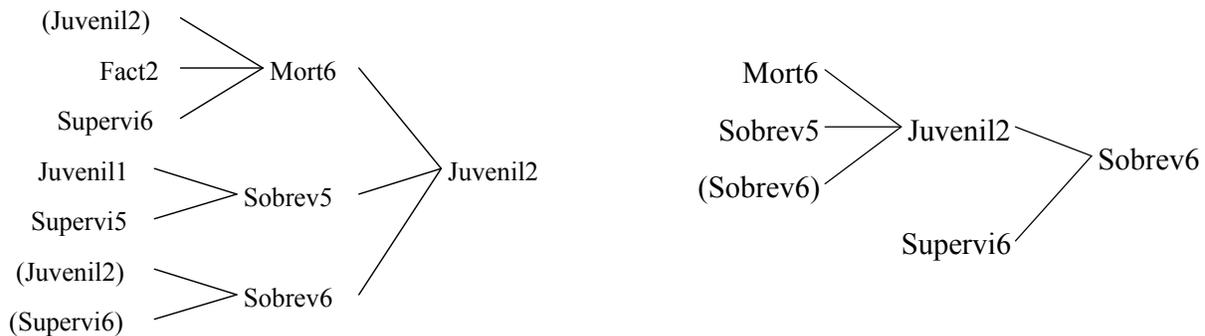
Por otro lado el diagrama de la derecha muestra a los sobrevivientes que están llegando a una siguiente categoría (5). Estos sobrevivientes dependen de las poblaciones de lombrices recién nacidas y del factor de supervivencia en primera instancia y a su vez estos dependen en mayor parte de los flujos de nacimientos.

Por otra parte los siguientes diagramas muestran a los sobrevivientes de la 4ª categoría que han llegado a una 5ª categoría con edad mayor de una semana (Juveniles1) y a los sobrevivientes de esta a una siguiente edad u categoría con sus respectivas dependencias causales.



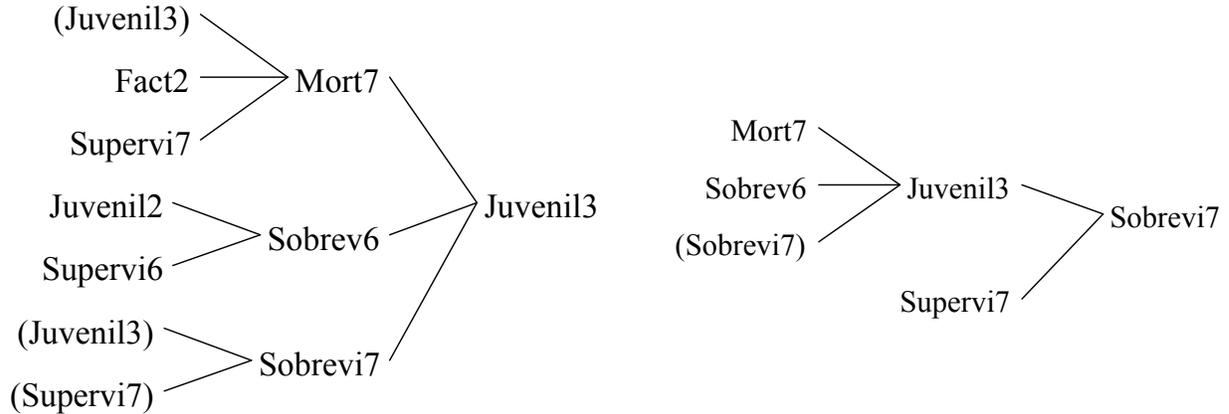
El diagrama de la izquierda presenta a dos primeros flujos (Mort4 y Sobrev4) denso dependientes de las poblaciones de lombrices de dos semanas de edad y estas son causas de las probabilidades de supervivencias ($supervi4=0.7$ y $supervi5 = 0.8$). De esta manera, esta categoría es gobernada por las supervivencias de 0.7 y 0.8, ya que estas inciden en la tasa de mortalidad y de sobrevivientes, de modo que los cambios efectuados provocarían variaciones en las poblaciones de juveniles de lombrices de dos semanas de edad (Juvenil1).

Por otro lado, el esquema de la derecha muestra a los sobrevivientes (sobrevi5) que forman parte de la población de lombrices a una posterior categoría (Juvenil2), con edad mayor de una semana a la anterior (Juvenil1). Entonces, el diagrama de la derecha muestra a los sobrevivientes de las poblaciones de lombrices de edad juvenil1 (segunda semana de nacidos) que están por llegar a una siguiente categoría (lombrices, 3 semanas de edad) y al factor de supervivencia de (0.8), que finalmente este decidirá si pueden llegar o no a la tercera edad. También puede observarse que las poblaciones de lombrices dependen al mismo tiempo de los sobrevivientes que llegaran a esta categoría. En los siguientes diagramas causales se presentan a las poblaciones de lombrices de 4 semanas de edad como también a la razón de los sobrevivientes que están llegando a esta edad.



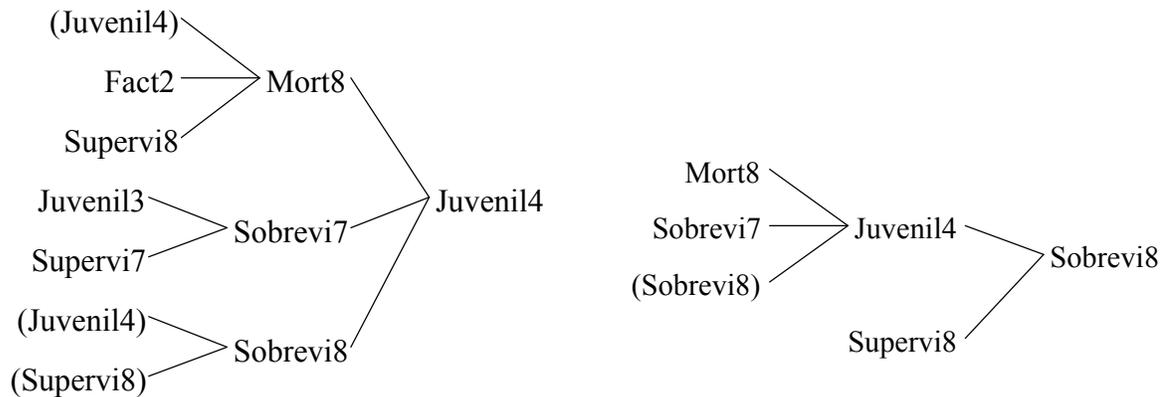
En un primer plano podemos observar a los factores que afectan a las poblaciones de 4 semanas de edad. Es decir los juveniles3 los cuales son afectados por las razones de cambios de mortalidad (mort8), sobrevivientes (sobrev6), que están llegando y por los sobrevivientes (sobrev7) que están por llegar a la siguiente edad (5 semanas de edad, pero según el diagrama esta trascendencia tanto de entrada y salida de las poblaciones dependerá directamente de la probabilidades de supervivencias correspondientes, y al mismo momento de las poblaciones de 3^a y 4^a semana de edad (Juvenil2 y juvenil3). Por lo tanto, podemos mencionar que las poblaciones de juveniles de 4 semanas de edad son el resultado de los sobrevivientes de 3 semanas de edad y estos a su vez son el producto de la 0.9 y de la población de individuos de 3 semanas de edad (Juvenil2).

De manera que las sobrevivientes (sobrev6) que están llegando a la categoría de individuos de 4 semanas de edad son causalmente afectados por los flujos de mortalidad de esta categoría (lombrices de 4 semanas de edad) y de los individuos que pasaran a una consecutiva edad (Juvenil4). Es decir la mortalidad es denso dependiente de las poblaciones de lombrices de 4 semanas de edad e indirectamente dependiente de las supervivencia de 0.9.. De igual forma para las tasas de sobrevivientes que llegaran a una posterior edad estos son afectados por la probabilidad de supervivencia de 0.9 (supervi7). Ver mas detalle en el diagrama de la derecha de esta descripción correspondiente.



En los siguiente árboles causales se observan a las influencias que ejercen los flujos de mortalidad (mort8), sobrevivientes de 4 semanas de edad y a los sobrevivientes de 5 semanas de edad sobre las poblaciones de lombrices de 5 semanas de edad.

La explicación correspondiente indica que las poblaciones de lombrices de 5 semanas de edad son determinadas por el flujo de entrada de los sobrevivientes de 4 semanas de edad y de las tasa de mortalidad de estos, influenciados por el factor de supervivencia de 0.91 y de los sobrevivientes de estas poblaciones (lombrices de 5 semanas de edad). Por lo tanto, las poblaciones de lombrices de 5 semanas serán la causa de los cambios que resulten de los flujos de entrada y salida, es decir los individuos de estas edades son el resultado de los individuos que sobrevivieron en una edad anterior. Posteriormente estos individuos experimentan con los cambios de estímulo – respuesta, o sea que las poblaciones de esta edad se vuelven denso-dependientes o se mueren (adaptarse o morirse). Esto nos indica que las poblaciones contenidas en esta categoría (Juvenil4) son dependientes del fenómeno de supervivencia (0.91).



El cuadro 18 representa de forma numérica la descripción del estadio juvenil del cual podemos analizar lo siguiente.

En el presente cuadro se observa que para una primera categoría (Rnacidos) han llegado 20.91 lombrices recién nacidas. Estas lombrices son el producto de la tasa de eclosión (21 recién nacidos) y las poblaciones de cocones que sobrevivieron a la tercera categoría de su correspondiente estadio con la probabilidad de supervivencia de 0.9.

Como ejemplo puede observar que para una primera semana (4) los recién nacidos a avanzan a una segunda categoría (juvenil1), entonces de 20.91 lombrices recién nacidas las que llegan a la segunda categoría (2 semanas de edad) 14.64, es decir los sobrevivientes de los recién nacidos son multiplicados por la probabilidad de supervivencia de 0.7 ($20.91 \cdot 0.7$). Posteriormente estos individuos (14.64) son multiplicados por la probabilidad de supervivencia de 0.8, de manera que los sobrevivientes presentes en una tercera categoría (juvenil2) son 11.712 lombrices de 3 semanas de edad. Estas lombrices de 3 semanas de edad pasan a una siguiente categoría (juvenil3) con cuatro semanas de edad, la probabilidad de que sobrevivan es de 0.9; Por tanto, el número de individuos los individuos de 4 semanas de edad será 10.539 lombrices. De manera que la probabilidad que sobrevivan estas poblaciones a una próxima categoría (Juvenil4) u edad es de 0.9. Por lo que los individuos contenidos en la categoría de juveniles4 (5 semanas de edad) serán de 9.485 lombrices. La probabilidad de que

estos sobrevivan a una siguiente categoría será de 0.91. Similarmente a esta descripción del cuadro podemos mencionar para cada una de las semanas simuladas.

Cuadro 18. Aumento poblacional de *Eisenia foetida* en el estadio de lombrices (edades juveniles) con base en las probabilidades de supervivencia, según el modelo construido.

semanas	Rnacidos	Juvenil1	Juvenil2	Juvenil3	Juvenil4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	20.91	0.00	0.00	0.00	0.00
5	20.66	14.64	0.00	0.00	0.00
6	20.42	14.46	11.71	0.00	0.00
7	20.17	14.29	11.57	10.54	0.00
8	19.93	14.12	11.43	10.41	9.49
9	19.69	13.95	11.30	10.29	9.37
10	19.45	13.78	11.16	10.17	9.26
11	19.22	13.62	11.03	10.04	9.15
12	18.99	13.45	10.89	9.92	9.04
13	18.76	13.29	10.76	9.80	8.93
14	18.54	13.13	10.63	9.69	8.82
15	18.31	12.97	10.51	9.57	8.72
16	18.09	12.82	10.38	9.46	8.61
17	79.78	12.67	10.26	9.34	8.51
18	139.99	55.85	10.13	9.23	8.41
19	198.73	97.99	44.68	9.12	8.31
20	256.05	139.11	78.39	40.21	8.21
21	311.97	179.24	111.29	70.55	36.19
22	366.50	218.38	143.39	100.16	63.50
23	419.68	256.55	174.70	129.05	90.15
24	471.53	293.78	205.24	157.23	116.14
25	522.08	330.07	235.02	184.72	141.51
26	571.35	365.46	264.06	211.52	166.24
27	619.35	399.94	292.36	237.65	190.37
28	666.13	433.55	319.95	263.13	213.89
29	711.69	466.29	346.84	287.96	236.82
30	939.30	498.18	373.03	312.15	259.16
31	1342.38	657.51	398.55	335.73	280.94
32	1914.52	939.67	526.01	358.69	302.16
33	2649.45	1340.16	751.73	473.41	322.82
34	3541.06	1854.61	1072.13	676.56	426.07
35	4583.40	2478.74	1483.69	964.92	608.90
36	5770.64	3208.38	1982.99	1335.32	868.42
37	7097.11	4039.45	2566.70	1784.69	1201.79
38	8557.29	4967.98	3231.56	2310.03	1606.22
39	10145.76	5990.10	3974.38	2908.40	2079.03

40	11857.28	7102.03	4792.08	3576.94	2617.56
41	13686.72	8300.10	5681.63	4312.87	3219.25
42	15629.06	9580.70	6640.08	5113.46	3881.58
43	18221.80	10940.34	7664.56	5976.07	4602.12
44	21976.54	12755.26	8752.27	6898.10	5378.46
45	27379.73	15383.58	10204.21	7877.05	6208.29
46	34893.44	19165.81	12306.86	9183.79	7089.34
47	44956.14	24425.41	15332.65	11076.18	8265.41
48	57983.34	31469.30	19540.32	13799.38	9968.56
49	74368.45	40588.34	25175.44	17586.29	12419.44
50	94483.22	52057.91	32470.67	22657.89	15827.66
51	118678.70	66138.25	41646.33	29223.60	20392.11
52	147285.67	83075.09	52910.60	37481.70	26301.24
53	180615.41	103099.97	66460.08	47619.54	33733.52
54	218960.23	126430.78	82479.98	59814.07	42857.59

Aumento poblacional de Eisenia foetida en edades juveniles (probabilidades)

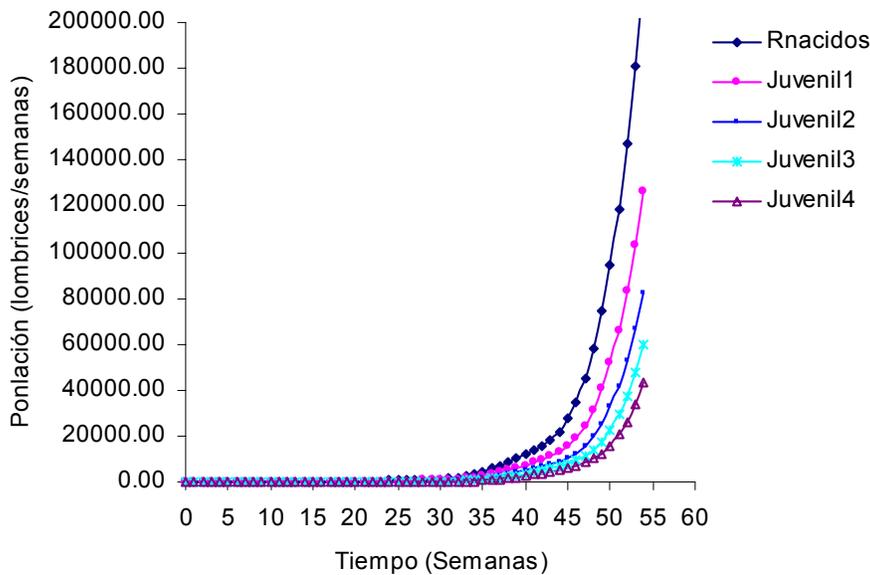


Figura 14. Crecimiento exponencial de poblaciones de lombrices de edades juveniles, con probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.

Tanto figura 13 como en el cuadro 18 se observa que al final de las 54 semanas simuladas hay aproximadamente 200, 000 lombrices recién nacidas. Sin embargo, al pasar estos individuos a la edad de juvenil1 solo sobreviven 130,000 lombrices

de dos semanas de edad. De modo que de estos individuos solo sobreviven a una siguiente edad 90, 000 lombrices durante un tiempo de 54 semanas. Por lo tanto en una siguiente categoría sobrevivirán 60,000 lombrices al final de las 54 semanas, mientras que en la categoría de juveniles4 (5 semanas de edad) solo habrá 30,000lombrices de 5 semanas de edad al final de las 54 semanas simuladas. Con base en la descripción de la grafica podemos observar que a menor probabilidad de supervivencia (0.7), la probabilidad de que sobrevivan los individuos a una segunda categoría (Juvenil1) es de 0.7. Este efecto puede apreciarse en la figura 14, mientras que a mayor probabilidad de supervivencia mayor será la probabilidad de que sobrevivan los individuos de las siguientes categorías del estadio juvenil, es decir las diferencias entre categorías al final de las 54 semanas serán menor.

**Tasas de mortalidad en la estructura de edades poblacionales de juveniles
(Probabilidades), según el modelo construido.**

El cuadro 19 muestra las razones de cambio de mortalidad que presentan cada una de las categorías de las poblaciones de lombrices del estadio juvenil de acuerdo con las probabilidades de supervivencias de 0.7, 0.8, 0.9, 0.9 y 0.91 durante las 54 semanas simuladas.

El cuadro 19. Presenta las tasas de mortalidad en cada una de las categorías que comprenden al estadio de juvenil.

semanas	Mort4	Mort5	Mort6	Mort7	Mort8
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	6.27419519	0	0	0	0
5	6.19890451	2.9279573	0	0	0
6	6.12451839	2.89282179	1.17118335	0	0
7	6.05102301	2.85810804	1.15712905	1.05406487	0
8	5.97841167	2.82381034	1.14324355	1.04141617	0.85379213
9	5.90666962	2.7899251	1.12952447	1.02891922	0.84354657
10	5.83579063	2.75644565	1.11597037	1.016572	0.83342409
11	5.7657609	2.72336864	1.10257852	1.00437331	0.82342285

12	5.69657087	2.69068813	1.08934784	0.99232066	0.81354189
13	5.6282115	2.65839934	1.07627559	0.98041302	0.80377936
14	5.56067276	2.62649846	1.0633601	0.96864802	0.79413408
15	5.49394608	2.59498048	1.05059969	0.95702404	0.78460443
16	5.42801762	2.5638411	1.03799248	0.94553971	0.7751891
17	23.934288	2.53307462	1.02553678	0.93419325	0.76588672
18	41.9956284	11.1693335	1.0132302	0.92298311	0.75669611
19	59.62006	19.5979595	4.46773481	0.91190714	0.74761587
20	76.8154373	27.822691	7.83918571	4.02096128	0.73864436
21	93.5895462	35.8471985	11.1290798	7.05526733	3.2569766
22	109.950043	43.6751175	14.3388863	10.0161715	5.71476364
23	125.904343	51.3100128	17.4700527	12.9049969	8.11309433
24	141.459961	58.7553558	20.5240116	15.7230473	10.453042
25	156.624084	66.0146408	23.5021496	18.4716091	12.7356606
26	171.403931	73.0912323	26.4058666	21.1519337	14.9619961
27	185.806488	79.9884872	29.2365055	23.7652779	17.1330566
28	199.838699	86.7096786	31.9954052	26.3128548	19.2498646
29	213.507339	93.258049	34.6838837	28.7958622	21.3134003
30	281.789978	99.6367493	37.3032303	31.2154961	23.3246346
31	402.714203	131.501968	39.8547134	33.5729065	25.2845383
32	574.354858	187.933273	52.6008072	35.8692398	27.1940384
33	794.833801	268.032257	75.1733322	47.3407249	29.0540695
34	1062.3175	370.922394	107.212944	67.6559982	38.3459663
35	1375.01868	495.748108	148.369003	96.4916458	54.8013268
36	1731.19104	641.675354	198.299301	133.532089	78.1581879
37	2129.1333	807.889038	256.670227	178.46936	108.160927
38	2567.18555	993.595337	323.155731	231.003174	144.560104
39	3043.72925	1198.0199	397.438263	290.840118	187.112473
40	3557.18506	1420.40686	479.208038	357.694427	235.580383
41	4106.01514	1660.01941	568.162903	431.287201	289.73233
42	4688.71777	1916.14014	664.007996	511.346619	349.342468
43	5466.5415	2188.06812	766.456299	597.607178	414.190521
44	6592.96191	2551.05249	875.227539	689.810669	484.061554
45	8213.91797	3076.71533	1020.42126	787.704773	558.746338
46	10468.0332	3833.16138	1230.68652	918.37915	638.040466
47	13486.8428	4885.08105	1533.26514	1107.6178	743.886719
48	17395.0039	6293.85938	1954.03284	1379.9386	897.169922
49	22310.5352	8117.66748	2517.54443	1758.62952	1117.74963
50	28344.9668	10411.5811	3247.06787	2265.79004	1424.48914
51	35603.6133	13227.6494	4164.63379	2922.36084	1835.28894
52	44185.7031	16615.0176	5291.06152	3748.17041	2367.11084
53	54184.625	20619.9922	6646.00928	4761.95508	3036.01611
54	65688.0703	25286.1543	8248	5981.40869	3857.18164

Tasas de mortalidad en poblaciones de *Eisenia foetida* en el estadio juvenil

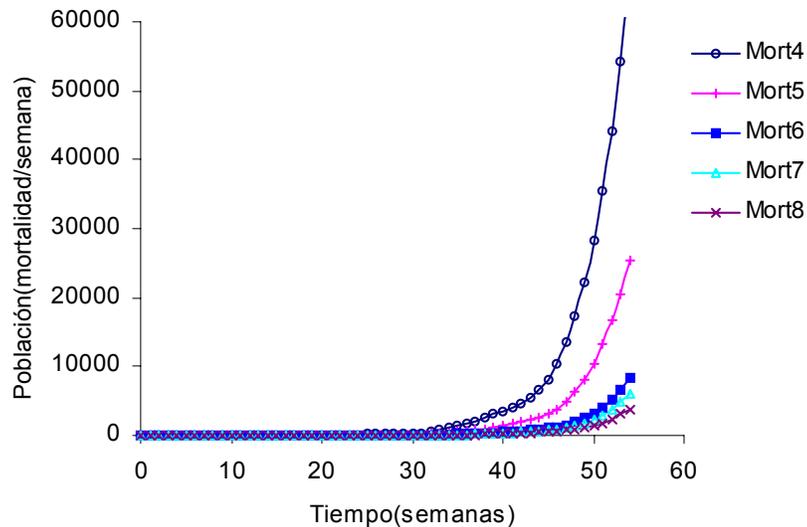


Figura 15. Crecimiento exponencial de las tasas de mortalidad en cada una de las categorías que comprenden a las edades juveniles de acuerdo a las probabilidades de supervivencias, según el modelo construido.

Tasas de sobrevivientes en la estructura de edades poblacionales de juveniles (Probabilidades), según el modelo construido.

Cuadro 20. Razones de cambio de individuos sobrevivientes que se encuentran en cada una de las categorías de las poblaciones del estadio juvenil de acuerdo con las probabilidades de supervivencias de 0.7, 0.8, 0.9, 0.9 y 0.91 durante las 54 semanas simuladas.

semanas	Nacimientos	Sobrev4	Sobrev5	Sobrev6	Sobrev7	Sobrev8
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	20.9139824	0	0	0	0	0
4	20.6630135	14.6397877	0	0	0	0
5	20.41506	14.4641094	11.7118301	0	0	0
6	20.1700764	14.2905416	11.5712881	10.5406466	0	0
7	19.9280376	14.1190529	11.4324331	10.4141588	9.4865818	0
8	19.6888981	13.949626	11.2952423	10.2891893	9.37274265	8.63278961
9	19.4526348	13.7822285	11.1597013	10.1657181	9.26027012	8.52919579

Continuación Cuadro 20

10	19.219202	13.6168442	11.0257826	10.0437307	9.14914608	8.4268465
11	18.9885693	13.4534416	10.8934755	9.92320442	9.03935719	8.32572269
12	18.760704	13.2919979	10.7627535	9.80412769	8.93088341	8.22581482
13	18.5355759	13.132493	10.6335983	9.68647766	8.82371426	8.12710476
14	18.3131523	12.9749031	10.5059948	9.57023811	8.7178297	8.02958012
15	18.0933914	12.8192062	10.3799229	9.45539474	8.61321449	7.93322515
16	79.7809601	12.6653738	10.2553654	9.34193039	8.50985527	7.83802557
17	139.985428	55.8466721	10.1322994	9.22982883	8.40773678	7.74396849
18	198.733521	97.9897995	44.6773376	9.1190691	8.30684566	7.65104055
19	256.051453	139.113464	78.3918381	40.2096024	8.2071619	7.55922985
20	311.965118	179.236008	111.290771	70.5526505	36.1886406	7.46851778
21	366.500092	218.375595	143.388809	100.16169	63.4973907	32.9316635
22	419.681122	256.550079	174.700485	129.049942	90.1455154	57.7826271
23	471.533173	293.776794	205.240067	157.230438	116.144943	82.0324249
24	522.080261	330.073212	235.021439	184.716049	141.507385	105.691902
25	571.346436	365.456177	264.058594	211.519287	166.244446	128.771729
26	619.354919	399.942505	292.36496	237.652725	190.367355	151.282455
27	666.128967	433.548431	319.953979	263.128479	213.887451	173.234299
28	711.691101	466.290283	346.838745	287.958588	236.815628	194.637589
29	939.299866	498.183777	373.032227	312.154877	259.162689	215.502228
30	1342.38062	657.509888	398.547028	335.728973	280.939392	235.838058
31	1914.51624	939.666443	526.007935	358.692322	302.156067	255.654861
32	2649.44556	1340.16125	751.733154	473.407135	322.82309	274.962036
33	3541.05835	1854.61206	1072.12915	676.559814	426.066406	293.769012
34	4583.39502	2478.74072	1483.6897	964.916199	608.903809	387.720428
35	5770.63672	3208.37671	1982.99255	1335.32068	868.424561	554.102478
36	7097.11035	4039.44556	2566.70166	1784.69324	1201.78845	790.266357
37	8557.28516	4967.97705	3231.5564	2310.03149	1606.22388	1093.62756
38	10145.7637	5990.09961	3974.38159	2908.40063	2079.02808	1461.66382
39	11857.2842	7102.03467	4792.07959	3576.94336	2617.56055	1891.91565
40	13686.7168	8300.09766	5681.62793	4312.87109	3219.24902	2381.98022
41	15629.0576	9580.70117	6640.07813	5113.46484	3881.58398	2929.5166
42	18221.8047	10940.3408	7664.56104	5976.07031	4602.11816	3532.24146
43	21976.5391	12755.2627	8752.27344	6898.10498	5378.46338	4187.92773
44	27379.7266	15383.5771	10204.21	7877.0459	6208.29443	4894.40186
45	34893.4414	19165.8086	12306.8623	9183.78906	7089.34131	5649.54834
46	44956.1406	24425.4082	15332.6475	11076.1758	8265.41016	6451.30029
47	57983.3477	31469.2988	19540.3262	13799.3828	9968.55762	7521.52344
48	74368.4453	40588.3398	25175.4395	17586.291	12419.4443	9071.3877
49	94483.2266	52057.9102	32470.6719	22657.8945	15827.6611	11301.6943
50	118678.703	66138.25	41646.3281	29223.6035	20392.1055	14403.1719
51	147285.672	83075.0938	52910.6016	37481.6953	26301.2402	18556.8164
52	180615.406	103099.969	66460.0781	47619.5391	33733.5234	23934.1289
53	218960.234	126430.781	82479.9766	59814.0703	42857.5859	30697.5078
54	262594.219	153272.156	101144.625	74231.9766	53832.6602	39000.4063

Los cambios que presenta este cuadro son causas de las probabilidades de supervivencias arriba mencionadas, de modo de ejemplo podemos señalar que para una 3ª semana hay 20.91 nacimientos, de estos sobreviven 14.64 (se murieron 6.97), de estos sobreviven a una segunda categoría de juveniles 11.71,

es decir se mueren 3. 83, posteriormente al sobrevivir estos (11.71) a una tercera categoría del estadio juvenil se lograrán 10.54 individuos (hay un deceso de 1.17), con base en esto podemos observar que a mayor probabilidad menor mortalidad y por tanto habrá más sobrevivientes, y así podemos ir describiendo para cada una de las semanas simuladas con sus respectivos desplazamiento. Entonces los cambios que presenta el cuadro es por que en inicio los individuos (primera categoría, Recien nacidos) están naciendo a tasa de 20.79 en una unidad de tiempo (una semana) pero la probabilidad de que sobrevivan es baja (0.7) por tanto a mayor edad mayor será la razón de que sobrevivan, y así podemos analizando a cada una de las tasas de sobrevivientes durante las 54 semanas simuladas.

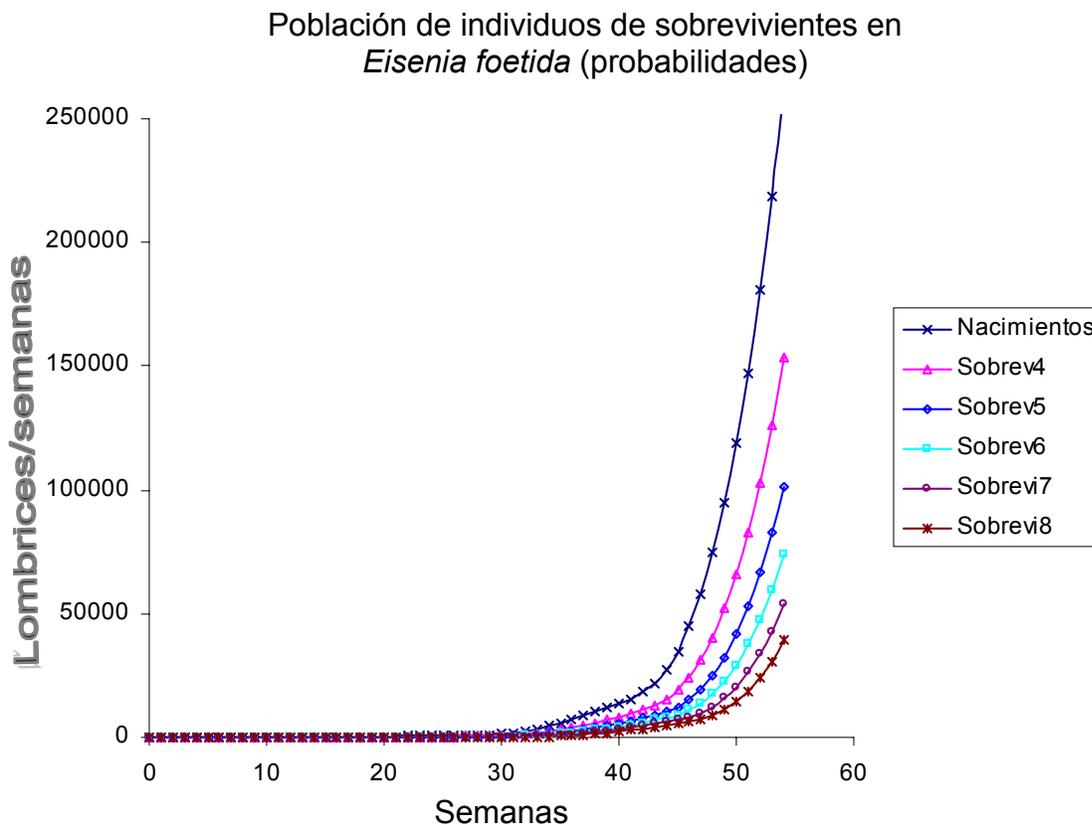


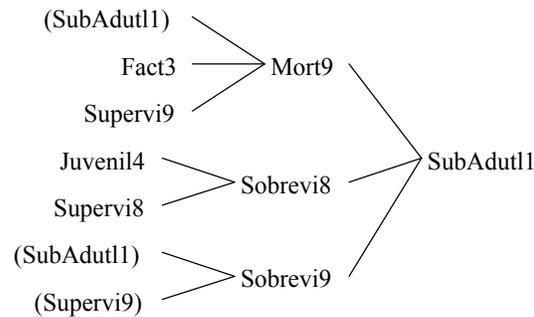
Figura 16. Crecimiento poblacional de las tasas de sobrevivientes, con base en las probabilidades de supervivencia, según el modelo construido.

La figura 16 al igual que el cuadro 20 presenta a las razones de cambio de las sobrevivientes de los individuos sobrevivientes en función de las probabilidades de supervivencia. En ambos planos se observa que en el intervalo de 0 – 35 semanas las poblaciones permanecen constantes, mientras que después de este tiempo la población se incrementan de manera exponencial ocupando menos tiempo para reproducirse hasta las 54 semanas simuladas. Se aprecia que las poblaciones de recién nacidos alcanzan tasas de sobrevivencias (sobrevivientes) de 250000, pero debido a la influencia de la probabilidad de supervivencia de 0.7, decae al pasar a una siguiente categoría a 160000 lombrices al final de las 54 semanas simuladas. Por otro lado, se observa que a medida que se van incrementando las probabilidades de supervivencia (0.8, 0.9, 0.9 y 0.91), existe mas probabilidad de que sobrevivan las poblaciones del estadio juvenil. Entonces, a mayor probabilidad menor mortalidad y mayor sobrevivientes.

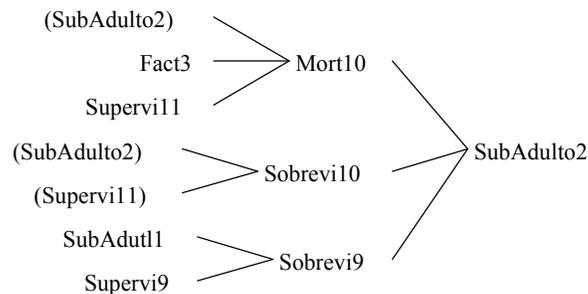
Estadio de Subadultos

Segunda corrida

Los individuos de este estadio son determinados por los juveniles sobrevivientes a la ultima categoría del estadio de juveniles, una vez que estos individuos llegan a la edad de subadultos (aparición del clitelum) permanecerán 4 semanas, en dicha estancia habrá efectos de mortalidad y supervivencia (sobrevivientes) como consecuencia de las proporciones de cada una de las semanas que presenta el estadio. Estas proporciones son distribuidas de manera homogéneas, porque consideramos que los individuos tienen mayor edad (6 – 9 semanas), es decir hay mas probabilidad de que sobreviva la mayoría de la población a este estadio. Los siguientes árboles causales representan a las poblaciones de subadultos en cada una de las categorías que lo conforman.



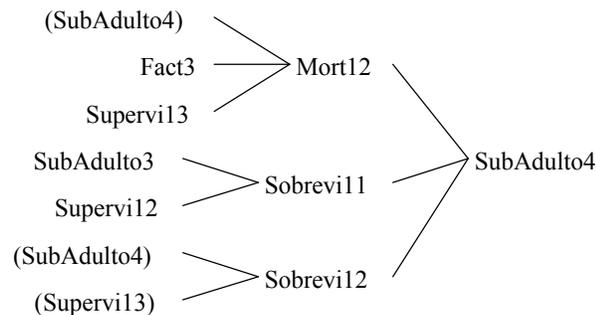
Este diagrama muestra a las poblaciones de lombrices subadultos y a los factores que la afectan. El análisis que podemos hacer aquí es que la población de lombrices subadultas (de 6 semanas de edad) de una primera categoría de este estadio, son construidas con base en la razón de individuos sobrevivientes a la última categoría del estadio de juveniles y de la tasa de mortalidad denso-dependientes de las poblaciones de lombrices subadultas al igual que de la probabilidad de supervivencia de 0.91. De manera análoga a esta descripción el siguiente esquema causal presenta a los individuos que conforman a una segunda categoría de este estadio.



Este diagrama presenta a las lombrices de 7 semanas de edad (subadulto2). Estos individuos son la razón de los individuos que sobrevivieron a la categoría anterior de este estadio. Se observa que la población de las lombrices de 7 semanas de edad (subadulto2) son afectadas por tres flujos, de los cuales dos de ellos (mort9 y sobrevi10) son denso-dependiente de esta población y dependiente de la probabilidad de supervivencia 0.91 (supervi11), y el último flujo

(sobrevi9) son los individuos que formaran parte de la segunda categoría. Por otro lado la siguiente relación causal presenta a la población de lombrices de 8 semanas de edad (3er categoría del estadio) en la que se observa que un flujo de individuos sobrevivientes a una anterior categoría (subadulto2) son los que están originando a los individuos de 8 semanas de edad, a la vez dependen de los flujos de mortalidad y de sobrevivencia (sobrevivientes), y de el numero número de lombrices de 8 semanas de edad, que de la probabilidad de supervivencia de 0.91 (supervi12) al igual que de las individuos que sobreviven a esta categoría (subadulto13).

Estos individuos al llegar a una siguiente categoría (subadulto14) será individuos de 9 semanas de edad los cuales dependen directamente de la tasa de mortalidad y de los individuos que sobreviven a esta, lo cual se describe mejor con el siguiente diagrama.



El presente diagrama muestra a los individuos que se encuentran en una cuarta categoría del estadio de subadulto. Se puede observar que estos individuos son afectados indirectamente por el factor de supervivencia 0.91, por la misma población presente en la categoría, y directamente por las tasa de mortalidad y de sobrevivientes de esta categoría (lombrices de 9 semanas de edad).

Similarmente a la descripción del estadio de subadulto. Se describe lo siguiente en cuadro 21. En este cuadro se puede notar las diferentes categorías que presenta el estadio de subadulto. De modo de ejemplo podemos observar que una primera categoría (subadulto1) hay 8.63 individuos de 6 semanas de edad, la

probabilidad de que avancen a una segunda, tercera y cuarta categoría dependerá de la probabilidad de supervivencia de 0.91.

El presente cuadro casi no presenta cambios debido a que la probabilidad de supervivencia es la misma para cada una de las categorías que comprende este estadio (subadulto).

Cuadro 21. Aumento poblacional de lombrices de 6 – 9 semanas de edad comprendidas en el estadio de subadultos, según el modelo construido.

semanas	SubAdult1	SubAdulto2	SubAdulto3	SubAdulto4
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	8.63278961	0	0	0
10	8.52919579	7.85583878	0	0
11	8.4268465	7.76156855	7.14881372	0
12	8.32572269	7.66843033	7.06302738	6.50542068
13	8.22581482	7.57640791	6.97827196	6.42735529
14	8.12710476	7.48549175	6.89453125	6.35022783
15	8.02958012	7.39566565	6.81179762	6.27402353
16	7.93322515	7.30691814	6.73005581	6.19873619
17	7.83802557	7.21923494	6.64929581	6.12435102
18	7.74396849	7.13260365	6.56950378	6.05085945
19	7.65104055	7.0470109	6.49066973	5.9782486
20	7.55922985	6.96244717	6.41278028	5.9065094
21	7.4685173	6.87889957	6.33582687	5.83563042
22	32.9316635	6.79635048	6.259799	5.76560259
23	57.7826271	29.9678154	6.18467903	5.69641733
24	82.0324249	52.5821915	27.2707119	5.62805748
25	105.691902	74.6495056	47.8497925	24.816349
26	128.771729	96.1796341	67.9310532	43.5433121
27	151.282471	117.182274	87.523468	61.8172607
28	173.234299	137.667053	106.635872	79.6463547
29	194.637589	157.643219	125.277023	97.0386429
30	215.502228	177.120209	143.455322	114.002098
31	235.838058	196.10704	161.179398	130.544342
32	255.654861	214.61264	178.457397	146.673248
33	274.962036	232.645935	195.297516	162.39624
34	293.769012	250.215454	211.707809	177.720749
35	387.720428	267.329803	227.696075	192.654114
36	554.102478	352.825623	243.270126	207.20343
37	790.266357	504.233276	321.071289	221.375824

38	1093.62756	719.142395	458.852264	292.174866
39	1461.66382	995.201111	654.419617	417.555542
40	1891.91565	1330.11401	905.633057	595.521851
41	2381.97998	1721.64331	1210.40381	824.126099
42	2929.5166	2167.60181	1566.69543	1101.46753
43	3532.24146	2665.85986	1972.5177	1425.69287
44	4187.92773	3214.33984	2425.93262	1794.99133
45	4894.40137	3811.0144	2925.04932	2207.59863
46	5649.54834	4453.90527	3468.02319	2661.79492
47	6451.30029	5141.08887	4053.05396	3155.90112
48	7521.52344	5870.68359	4678.39063	3688.2793
49	9071.38867	6844.58643	5342.32227	4257.33545
50	11301.6943	8254.96387	6228.57373	4861.51318
51	14403.1719	10284.542	7512.01758	5668.00244
52	18556.8164	13106.8867	9358.93359	6835.93604
53	23934.1289	16886.7031	11927.2676	8516.62988
54	30697.5078	21780.0586	15366.9004	10853.8145

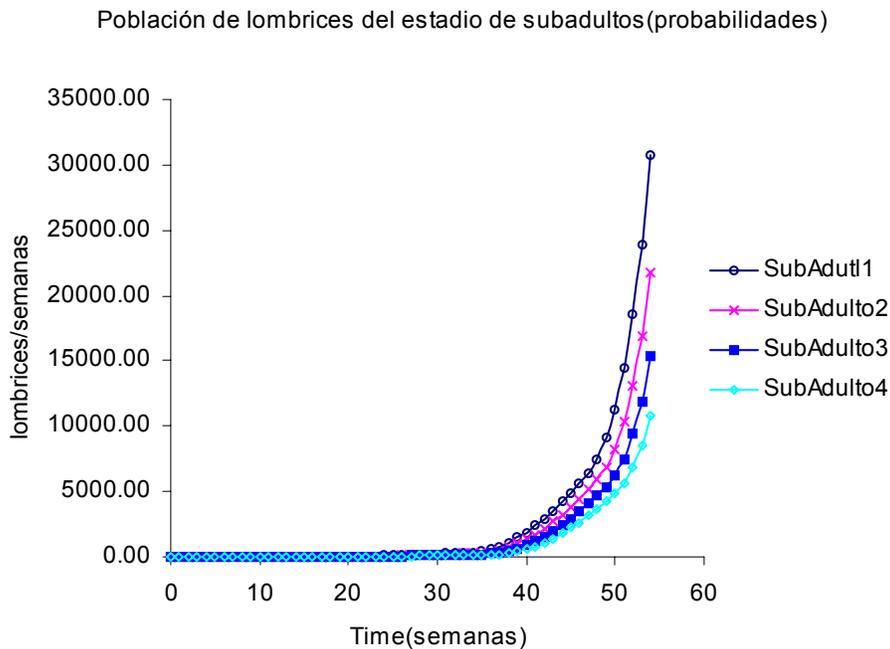


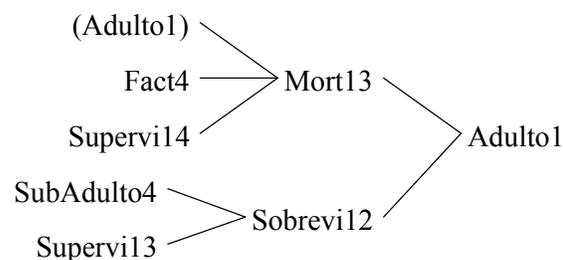
Figura 17. Crecimiento exponencial de lombrices subadultas, de acuerdo a la probabilidad de supervivencia de 0.9, según el modelo construido.

La presente figura al igual que el cuadro 21 describe el comportamiento poblacional de *Eisenia foetida* durante 54 semanas, es decir al final de la 54 semanas la población de lombrices de 6 semanas de edad es aproximadamente 35000, al pasar estas a una siguiente edad solo sobreviven 25000 lombrices de 7 semanas de edad, mientras que para una cuarta categoría solo llegaran 15000 lombrices. Estos cambios se deben principalmente a la probabilidad de supervivencia, ya que estas influyen en las tasas de mortalidad y en las tasas de sobrevivientes, es decir a mayor probabilidad mayor mortalidad o sea sobreviven mas pero también se mueren más.

Estadio de Adulto

Segunda corrida

Las poblaciones de lombrices maduras sexualmente dependen básicamente de ellas mismas (población inicial = 2) y de la esperanza de vida que le provee la naturaleza. Los cambios en estas poblaciones se deben principalmente a su descendientes u generaciones.



Con base en este diagrama causal podemos ver que la población de adultos maduros sexualmente dependen de los flujos, uno de mortalidad y otro de la tasa de individuos que sobreviven en una ultima categoría del estadio de subadultos. El flujo de mortalidad depende de la probabilidad de supervivencia 0.988 y esta a su vez depende de la esperanza de vida de la especie(16 años) y al mismo instante depende de la población de lombrices adultas.

Los cambios del cuadro 22 se deben principalmente a la población inicial (dos lombrices maduras sexualmente) y a los individuos sobrevivientes al final del estadio de subadultos producto de la población inicial. De esta manera podemos observar que de 20.914 recién nacido solo llega a la madurez sexual 1.97 lombrices. Estos se debe a la influencia de la probabilidad de supervivencias de Edwards y Lofty (1978). Sin embargo esto no afecta a la población inicial pero si afecta a un lombricultor porque entonces el dirá que su pide de cría no es viable para la reproducción.

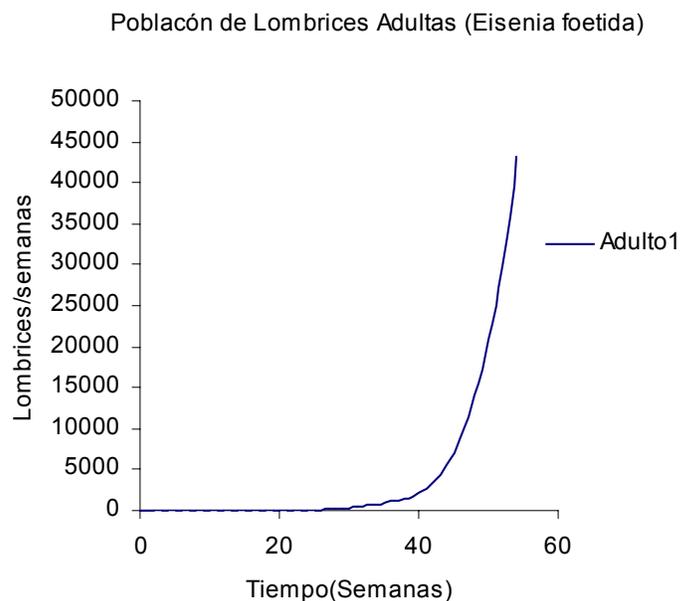


Figura 18. Crecimiento poblacional de lombrices (*Eisenia foetida*) maduras sexualmente, según el modelo construido.

La presente figura muestra un crecimiento exponencial de *Eisenia foetida* durante 54 semanas simuladas, de esta manera se tiene que al final de este periodo existe una población de 50000 lombrices adultas. El resultados comienza a diferenciarse a partir de las 23 semanas con un crecimiento lento hasta las 42 semanas posteriormente se mantiene un crecimiento ilimitado hasta las 54 semanas.

A continuación presentamos en la figura 19 de manera resumida a las poblaciones de cocones totales, juveniles totales, subadultos totales y adultos totales de acuerdo a las probabilidades de supervivencia, así como también la población total de estos.

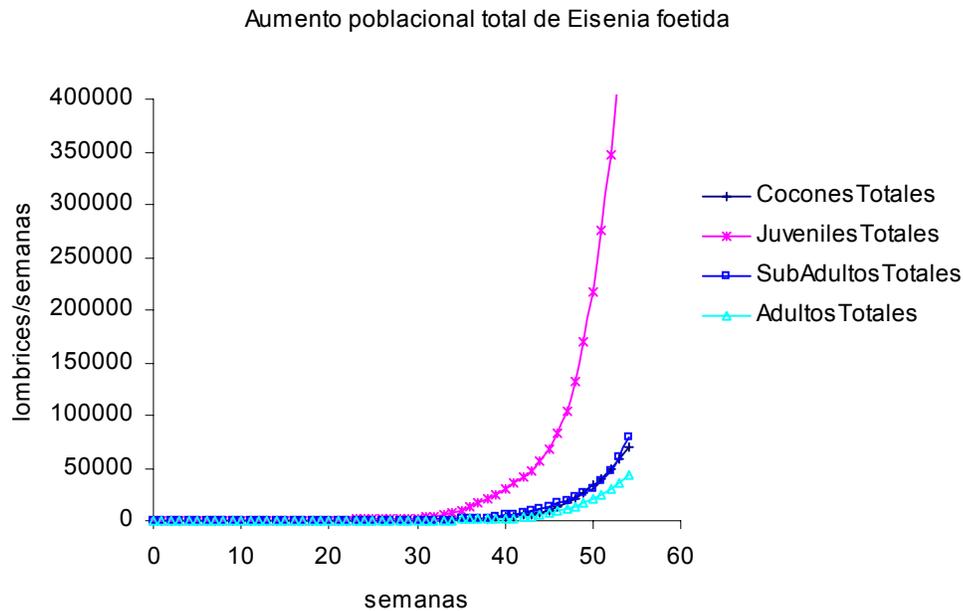


Figura 19. presenta a las poblaciones totales de los estadios de cocon, juvenil, subadulto y adulto respectivamente.

En la presente figura podemos apreciar que con una población 100,000 cocones al final de la 54 semanas simuladas se alcanza una población 400000 lombrices jóvenes, esto se debe a que la tasa de eclosión es de 21 recién nacidos, se aprecia también que al pasar estas poblaciones al siguiente estadio (subadulto) solo sobreviven 110000lombrices. Por otro lado, cuando los subadultos pasan a la edad adulta únicamente sobreviven 50,000. Estos decesos se deben a la influencia de las probabilidades de supervivencia publicadas por Shield (1999) Edwards y Lofty (1978).

Fracción Poblacional

Segunda corrida

La Figura 20 muestra a la fracción poblacional, los cambios que esta presenta se debe principalmente a la descendencia de la misma. En una primera instancia se observa que los adultos son superados por su propia descendencia, se observa que en un principio los adultos se aparean y como consecuencia tiene el 0.60 de población de cocones, pero a medida que estos son superados disminuye el número de cocones, por otra parte las poblaciones de juveniles y subadultos se sobreponen a los adultos, pero estos difieren en cuanto a fracciones y esta diferencia se debe que los subadultos poseen mayor probabilidad de supervivencia que los juveniles. De esta manera estamos diciendo que al ser poblado el espacio por los juveniles y subadultos es menor la probabilidad que los individuos maduros sexualmente se apareen y cuando pasa esto buscan su estabilidad ecológica a las 27 semanas, mientras que las poblaciones de cocones juveniles y subadultos la logran a las 35 semanas.

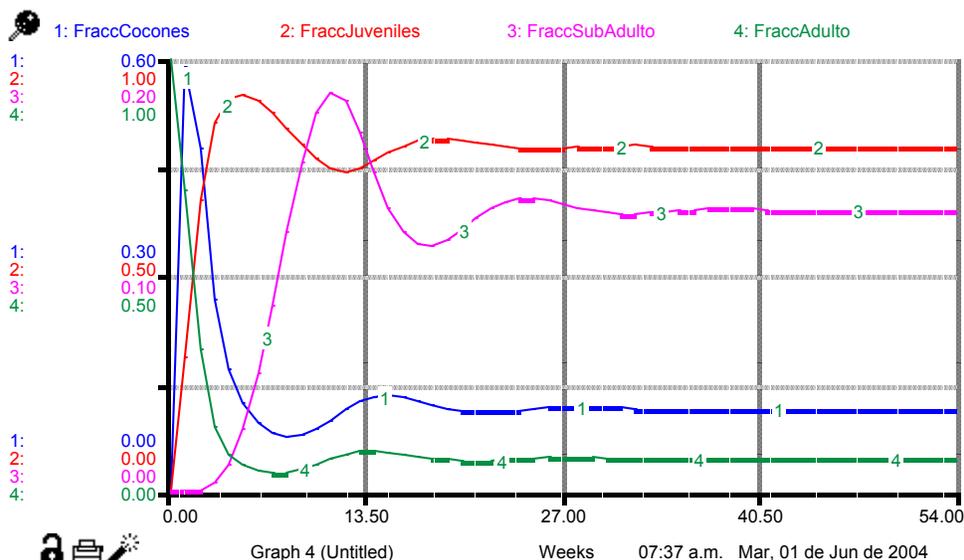


Figura 20. Fracción poblacional de *Eisenia foetida* con base en las probabilidades, según el modelo construido.

En lo que corresponde al estadio cocon podemos observar que durante la 0 – 7 semanas hay mayor población, pero cuando estos comienzan a eclosionar disminuye la población, debido a que hay mas poblaciones de recién nacidos y es más difícil de que exista el apareamiento entre dos hermafroditas maduras sexualmente, pero cuando estos (recién nacidos) llegan a la madurez sexual, los adultos empiezan a equilibrarse debido a que hay mas probabilidad de encontrar un adulto sexualmente (conforme se van haciendo viejos van seleccionando a su pareja y esto lo hacen con el fin de no desperdiciar su apareamiento u energía). Sin embargo en las poblaciones de juveniles y subadultos se mantiene un crecimiento exponencial hasta las 12 semanas (madurez sexual), cuando llegan a este tiempo comienzan a aparearse y lo hacen con el primer individuos maduro sexualmente que encuentren, pero después de las 26 semanas inician a seleccionar su pareja y cuando hacen esto se están manteniendo en equilibrio. A continuación se presenta a la Figura que compara a las poblaciones de lombrices recién nacidas tanto predichas por el modelo como observadas (datos empíricos, Apéndice 2) que comprenden 2 y 21 recién nacidos

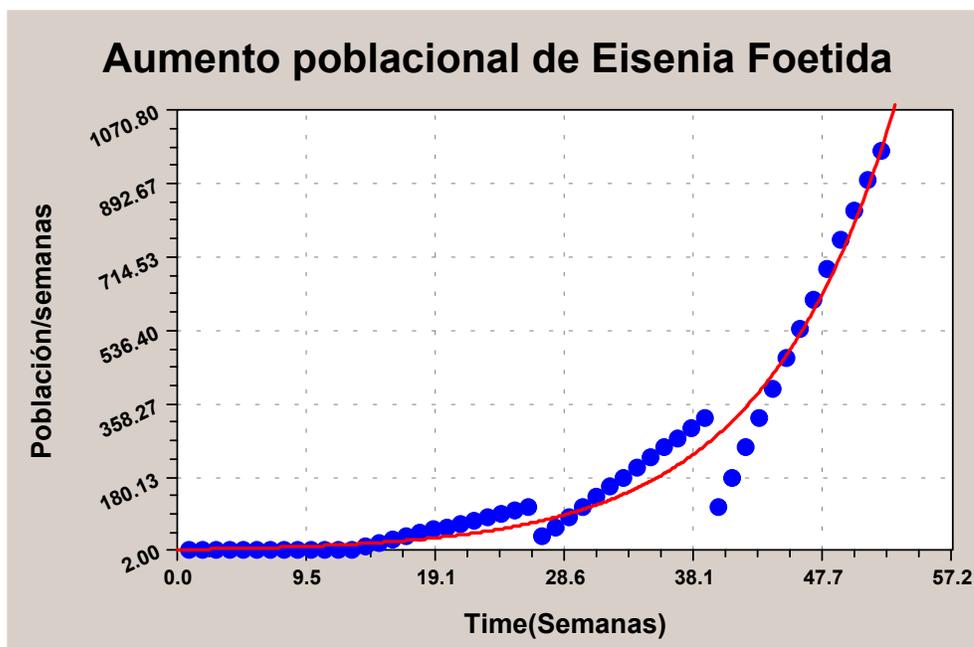


Figura 21. Crecimiento exponencial de lombrices recién nacidas de *Eisenia foetida*, tanto predichos como observados (datos empíricos, Ferruzzi 2001).

La presente figura muestra con una línea a las poblaciones de recién nacidos predichos por el modelo (bajo la condición de la primera corrida) y con un círculo a las poblaciones observadas según datos empíricos con un coeficiente de determinación de 0.98, es decir existe buena correlación entre los datos de poblaciones del modelo y de datos empíricos. En la presente grafica se observa un crecimiento constante tanto de datos observados como predichos, esto se debe a que en un principio (0 – 13 semanas) solo se reproduce la población inicial (2 adultos maduros sexualmente), después se observa en ambas estimaciones un crecimiento lento has las 26 semanas, este crecimiento es causa de la población inicial y de los descendientes que están alcanzando la madures sexual. Después de este periodo se aprecia un crecimiento exponencial mayor, esto es porque las descendencia de la población inicial son mayores, y al estarse reproduciendo ambas se incrementa la densidad poblacional durante las 52 semanas simuladas y observadas.

DISCUSIÓN

Población ideal

El modelo de simulación para estimar la dinámica de una población ideal de *Eisenia foetida* (Lombriz de Tierra, Roja Californiana), presentó predicciones confiables en los estadios de juvenil, suabadulto y adulto al compararlos con los datos de Ferruzzi (2001).

Para ajustar las predicciones a las características del sistema simulado, es necesario adecuar la población inicial, fecundidad y supervivencia, es decir parametrizar idealmente a estos parámetros.

Las relaciones lógicas del modelo consideran un efecto directo de la población inicial y de las probabilidades de supervivencias.

Estadio de Cocon

Las estimaciones de este estadio no se ajustan a los datos empíricos de Ferruzzi (2001). Sin embargo, si se cumple con las condiciones teóricas empíricas citadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1978). De acuerdo con esto, este estadio es la causa de ajuste para los datos empíricos citados por Ferruzzi (2001).

Estadio Juvenil, Suabdulto y Adulto

El cálculo de estos estadios se ve afectado teóricamente por la tasa de eclosión (r), de las poblaciones de cocones que están eclosionando. En este caso los datos predichos se ajustaron a los datos empíricos con un coeficiente de correlación de 0.98 en ambas categorías de los estadios, pero esto no es un buen ajuste por lo que es necesario modificar el método de estimación para lograr una mejor correlación, desafortunadamente hasta el momento no existe un modelo de *Eisenia foetida* que tenga un coeficiente de correlación de 1. Cuando el modelo fue calibrado con los datos empíricos, la tendencia fue que los estimo en forma

acumulativa y no por bloques (datos de Ferruzzi, 2001). Sin embargo, al comparar las poblaciones de los estadios con los datos empíricos hubo buena correlación es decir que a pesar de que los estimo (a los juveniles y subadultos) de forma acumulada presentaron confiabilidad en cuanto a correlación, ver Figura 21.

La potencialidad de los modelos de simulación se ve restringida principalmente por la obtención y manejo de datos. Así mismo la elaboración y análisis de un modelo dependen de la calidad de la información que se extrae del sistema real.

Por lo anterior, es necesario tener presente que la manifestación del aumento poblacional de *Eisenia foetida* y su interpretación mediante los estadios (cocon, juvenil, subadulto y adulto) esta fuertemente influenciado por las condiciones de la población inicial y de la tasa de eclosión (r) presentes.

Es necesario mencionar finalmente que si bien el modelo analizado requiere ser adecuado a las condiciones de los datos que se quieran utilizar, el modelo de simulación, como herramienta permitió distinguir las manifestaciones continuas y lógicas (antecedentes) del aumento poblacional de *Eisenia foetida*.

Por otro lado cabe puntualizar que una segunda corrida se hizo con el fin de experimentar con el modelo utilizando las probabilidades de supervivencias publicadas por Shield (1999), Edwards y Lofty (1978). De manera general podemos comentar teóricamente que; las probabilidades de supervivencia empleadas con la lógica de menor a mayor, afectan significativamente a cada una de los estadios que presenta la especie.

CONCLUSIONES

- 1.- El modelo de simulación para estimar la dinámica de una población ideal de la lombriz roja californiana requiere ser mas ajustado principalmente en la predicción del estadio juvenil y también en el estadio adulto.
- 2.- El modelo arrojo predicciones confiables en las poblaciones de recién nacidos (estadio de juvenil), pero se requiere un mayor ajuste.
- 3.- El modelo coincide con los señalamientos teóricos de Ferruzzi (2001) del estadio de cocon.
- 4.- Al manejar los mismos parámetros iniciales de Ferruzzi (2001) no hay cambios en la población de subadultos, es decir son los mismos juveniles, pero con la diferencia de edad.
- 5.- El modelo arrojo predicciones confiables de adultos, cuando se establecen los parámetros ideales, pero se requiere mayor ajuste.
- 6.- Una de las principales limitaciones para elaborar, adecuar y utilizar los modelos de simulación es la disponibilidad de información.

LITERATURA CITADA

Alanis, A.C. 2003. Introducción al Conocimiento de la Lombricultura. Monografía. UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 103 p.

Abogado, B. P. 1989. Análisis de un Modelo Dinámico de Simulación para Predecir el Rendimiento de maíz (zea mays L.). M. C. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 138.p

Baltierra, L. F. 2003. Capacidad Reproductiva de la Lombriz de tierra (Eisenia sp.) en una unidad vermicola. Tesis Profesional. UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 48 p.

Booolotian, R. A. 1999. Fundamentos de Zoología. Cuarta reimpresión. Editorial Limusa. México, D.F.

Capistrán T., E. Aranda y J. C. Romero. 2001. Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje. Primera Edición. Instituto de Ecología A. C. Xalapa , Veracruz, México.

Capra F. 996. The web of life: Anchor Books Doubleday. A New Scientific Understanding of Living Systems. New York. USA. 347p.

Carrillo S., J. A. 2000. An Examination of the Prediction of Yield from two Potato Models. PhD. Thesis. University of Nottingham.

Caughley, G. 1978. Analysis of Vertebrate Populations. John Wiley & Sons. New York. USA. 233 p.

Centro de Estudios Agropecuarios. 2001. Lombricultura, Serie Agronegocios

Compagnoni L. y G. Putzolo. 1998. Cría Moderna de Lombrices y utilización rentable del humus. Primera edición. Editorial De Vecchi. Barcelona, España.

Ebert, A. T. 1998. Plant and Animal Populations: Methods In Demography. Press, San Diego, California. USA. 312 P.

Edwards A. C., y Lofty R. J. 1977. Biology of Earthworms. Chapman and Hall. London. Great Britain. 316 p.

Emmel, T. C. 1978. Population Biology. Harper & Row. USA. 371p.

Ferruzzi C. 2001. Manual de Lombricultura. Tercera Reimpresión. Ediciones Mundi prensa. Barcelona, España.

Ford A. 1999. Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Systems. Island Press. USA. 359 p.

Frere, M., 1987. The FAO agroclimatological data base and its possible use for the study of rice-weather relationships. In: D.V. (ed.): The impact of weather parameters on the growth and yield of rice. Irri, los baños, Philipinas.

Grant, W. E., Pedersen, K. E., Marin L. S. 1997. Ecology and natural resource management: Systems analysis and simulation. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 368 p.

Harrell, C. 2000. Simulation; Using Promodel. McGraw-Hill Companies. USA. 287 p.

Innis, S. G. 1978. Grassland Simulation Model. Springer-Verlag. New York. USA. 287 p.

Johson I. R y Thornley J. H. M. 1983. Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. *Plant, Cell and Enviroment*. 4, 721 – 729 .

Lee K. E. 1985. *Earthworms: Their Ecology and Relationship with Soil and Use*. Adademic Press Inc. Australia.

Martinez C. C. 1999. *Potencial de la Lombricultura*. Técnica Mexicana. Texcoco, Estado de México, México.

Peart M. R y Curry B. R. 1998. *Agricultural Systems Modelling and Simulation*. Marcel Dekker, Inc. USA. 696 P.

Pianka, R. E. 1978. *Evolutionary Ecology*. Second Edition. Harper & Row, Publishers. New York, USA. 397

Pielou W. P. 1975. *Spatial Patterns and Statitical Distributions*. The Pennsylvania State University. USA. Volumen 1.

Pool, W. R. 1978. *An introduction to Quantitative Ecology*. McGraw-Hill series in population biology. Tokyo, Japan. 527 p.

Rienes A. M., C. Rodríguez, A. Sierra y M. M. Vásquez. 1998. *Lombrices de tierra con valor comercial*. Universidad Habana, Depto. De Biología Animal y Humana., Universidad de Quitana Roo, Depto. De Recursros Naturales, México.

Saravia, A. 1983. *Un enfoque de sistemas: Para el Desarrollo Agrícola*. Primera Edición; 3ª reimpresión. San José, Costa Rica. 245p.

Saruhkán, J. 1987. *Introducción a la Ecología de Poblaciones: Un enfoque demográfico*. Primera Edición. CECSA. México, México. 73 p.

Shields, B. E. 1999. Raising Earthworms for Profit. Twentieth Edition. Shields Publications. USA. 128 P.

Tanner T. J. 1978. Guide To The Study of Animal Populations. University of Tennessee Pres: Knoxville. USA. 181 p.

Thornley J. H. M, Johnson IR. 1990 Plant and crop modelling. Oxford: University Press.

Thornley J. H. M. 1998. Grassland Dynamics: CAB International, Walling Ford, UK.

Apéndice 1

Cuadro 4. Aumento de la población durante las 27 – 39 semanas representadas simbólicamente por L_0 y r .

27 – 39 Semanas

$$\begin{aligned}
 27 &- \{ [L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r).r]r \} \\
 28 &- \{ [L_0 + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r).r]r \} \\
 29 &- \{ [L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r).r]r \} \\
 30 &- \{ [L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r).r]r \} \\
 31 &- \{ [L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r).r]r \} \\
 32 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r) \\ + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 33 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r) \\ + L_0.r + L_0.r + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 34 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r) \\ + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 35 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r) \\ + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 36 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r) \\ + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 37 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r + (L_0) \\ + L_0.r \end{array} \right]r \right\} \\
 38 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r \\ + (L_0 + L_0.r + \\ L_0.r) \end{array} \right]r \right\} \\
 39 &- \left\{ \left[\begin{array}{l} L_0 + L_0.r \\ + L_0.r + (L_0 + L_0.r + \\ L_0.r + L_0.r + L_0.r) \end{array} \right]r \right\}
 \end{aligned}$$

Cuadro 5. Incremento de la población comprendidas en el rango de 40 – 52 semanas, representadas por L_0 y r .

De 40 a 52 semanas

$$\begin{aligned}
 & 40 - \{L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r).r + [L_0 + L_0.r + (L_0 + L_0.r).r]r\}.r \\
 & \bullet \\
 & \bullet \\
 & \bullet \\
 & \bullet \\
 & \left. \begin{aligned}
 & L_0 + L_0.r \\
 & 52 - \left\{ + L_0.r + (L_0 + L_0.r + \right. \\
 & \left. L_0.r + L_0.r + L_0.r).r + \left[\begin{aligned}
 & L_0 + L_0.r \\
 & + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + L_0.r + (L_0 + L_0.r + L_0.r + L_0.r \\
 & + L_0.r \\
 & + L_0.r).r \end{aligned} \right] \right\}.r
 \end{aligned} \right\}.r
 \end{aligned}$$

Apéndice 2

Cuadro1. Aumento de la población de un lecho en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 2 recién nacidos por lombriz.

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	De la 40ª a la 52 semana
$1 - 2 \times 2 = 4$	$14 - (2+ 4) \times 2 = 12$	$27 - (2+ 4+ 12) \times 2 = 36$	$40 - (2+ 4+ 12+ 36) \times 2 = 108$
$2 - 2 \times 2 = 4$	$15 - (2+ 8) \times 2 = 20$	$28 - (2+ 8+ 20) \times 2 = 60$	$41 - (2+ 8+ 20+ 60) \times 2 = 180$
$3 - 2 \times 2 = 4$	$16 - (2+12) \times 2 = 28$	$29 - (2+12+ 28) \times 2 = 84$	$42 - (2+12+ 28+ 84) \times 2 = 252$
$4 - 2 \times 2 = 4$	$17 - (2+16) \times 2 = 36$	$30 - (2+16+ 36) \times 2 = 108$	$43 - (2+16+ 36+108) \times 2 = 324$
$5 - 2 \times 2 = 4$	$18 - (2+20) \times 2 = 44$	$31 - (2+20+ 44) \times 2 = 132$	$44 - (2+20+ 44+132) \times 2 = 396$
$6 - 2 \times 2 = 4$	$19 - (2+24) \times 2 = 52$	$32 - (2+24+ 52) \times 2 = 156$	$45 - (2+24+ 52+156) \times 2 = 468$
$7 - 2 \times 2 = 4$	$20 - (2+28) \times 2 = 60$	$33 - (2+28+ 60) \times 2 = 180$	$46 - (2+28+ 60+180) \times 2 = 540$
$8 - 2 \times 2 = 4$	$21 - (2+32) \times 2 = 68$	$34 - (2+32+ 68) \times 2 = 204$	$47 - (2+32+ 68+204) \times 2 = 612$
$9 - 2 \times 2 = 4$	$22 - (2+36) \times 2 = 76$	$35 - (2+36+ 76) \times 2 = 228$	$48 - (2+36+ 76+228) \times 2 = 684$
$10 - 2 \times 2 = 4$	$23 - (2+40) \times 2 = 84$	$36 - (2+40+ 84) \times 2 = 252$	$49 - (2+40+ 84+252) \times 2 = 756$
$11 - 2 \times 2 = 4$	$24 - (2+44) \times 2 = 92$	$37 - (2+44+ 92) \times 2 = 276$	$50 - (2+44+ 92+276) \times 2 = 828$
$12 - 2 \times 2 = 4$	$25 - (2+48) \times 2 = 100$	$38 - (2+48+ 100) \times 2 = 300$	$51 - (2+48+100+300) \times 2 = 900$
$13 - 2 \times 2 = 4$	$26 - (2+52) \times 2 = 108$	$39 - (2+52+ 108) \times 2 = 324$	$52 - (2+52+108+324) \times 2 = 972$

Cuadro 6. Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 3 recién nacidos por lombriz.

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	De la 40ª a la 52 semana
$1 - 2 \times 3 = 6$	$14 - (2+ 6) \times 3 = 24$	$27 - (2+ 6+ 24) \times 2 = 96$	$40 - (2+ 6+ 24+ 96) \times 2 = 384$
$2 - 2 \times 3 = 6$	$15 - (2+12) \times 3 = 42$	$28 - (2+ 12+ 42) \times 2 = 168$	$41 - (2+ 12+ 42+168) \times 2 = 672$
$3 - 2 \times 3 = 6$	$16 - (2+18) \times 3 = 60$	$29 - (2+18+ 60) \times 2 = 240$	$42 - (2+18+ 60+240) \times 2 = 960$
$4 - 2 \times 3 = 6$	$17 - (2+24) \times 3 = 78$	$30 - (2+24+ 78) \times 2 = 390$	$43 - (2+24+ 78+390) \times 2 = 1560$
$5 - 2 \times 3 = 6$	$18 - (2+30) \times 3 = 96$	$31 - (2+30+ 96) \times 2 = 384$	$44 - (2+30+ 96+384) \times 2 = 1536$
$6 - 2 \times 3 = 6$	$19 - (2+36) \times 3 = 114$	$32 - (2+36+114) \times 2 = 456$	$45 - (2+36+114+456) \times 2 = 1824$
$7 - 2 \times 3 = 6$	$20 - (2+42) \times 3 = 132$	$33 - (2+42+132) \times 2 = 528$	$46 - (2+42+132+528) \times 2 = 2112$
$8 - 2 \times 3 = 6$	$21 - (2+48) \times 3 = 150$	$34 - (2+48+150) \times 2 = 600$	$47 - (2+48+150+600) \times 2 = 2400$
$9 - 2 \times 3 = 6$	$22 - (2+54) \times 3 = 168$	$35 - (2+54+168) \times 2 = 672$	$48 - (2+54+168+672) \times 2 = 2688$
$10 - 2 \times 3 = 6$	$23 - (2+60) \times 3 = 186$	$36 - (2+60+186) \times 2 = 744$	$49 - (2+60+186+744) \times 2 = 2976$
$11 - 2 \times 3 = 6$	$24 - (2+66) \times 3 = 204$	$37 - (2+66+204) \times 2 = 816$	$50 - (2+66+204+816) \times 2 = 3264$
$12 - 2 \times 3 = 6$	$25 - (2+72) \times 3 = 222$	$38 - (2+72+222) \times 2 = 888$	$51 - (2+72+222+888) \times 2 = 3552$
$13 - 2 \times 3 = 6$	$26 - (2+78) \times 3 = 240$	$39 - (2+78+240) \times 2 = 960$	$52 - (2+78+240+960) \times 2 = 3840$

Cuadro 7. Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 9 recién nacidos por lombriz.

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	De la 40ª a la 52 semana
$1 - 2 \times 9 = 18$	$14 - (2 + 18) \times 3 = 180$	$27 - (2 + 18 + 180) \times 9 = 1800$	$40 - (2 + 18 + 180 + 1800) \times 9 = 1800$
$2 - 2 \times 9 = 18$	$15 - (2 + 36) \times 3 = 342$	$28 - (2 + 36 + 342) \times 9 = 3420$	$41 - (2 + 36 + 342 + 3420) \times 9 = 3420$
$3 - 2 \times 9 = 18$	$16 - (2 + 54) \times 3 = 504$	$29 - (2 + 54 + 504) \times 9 = 5040$	$42 - (2 + 54 + 504 + 5040) \times 9 = 5040$
$4 - 2 \times 9 = 18$	$17 - (2 + 72) \times 3 = 666$	$30 - (2 + 72 + 666) \times 9 = 6660$	$43 - (2 + 72 + 666 + 6660) \times 9 = 6660$
$5 - 2 \times 9 = 18$	$18 - (2 + 90) \times 3 = 828$	$31 - (2 + 90 + 828) \times 9 = 8280$	$44 - (2 + 90 + 828 + 8280) \times 9 = 8280$
$6 - 2 \times 9 = 18$	$19 - (2 + 108) \times 3 = 990$	$32 - (2 + 108 + 990) \times 9 = 9900$	$45 - (2 + 108 + 990 + 9900) \times 9 = 9900$
$7 - 2 \times 9 = 18$	$20 - (2 + 126) \times 3 = 1152$	$33 - (2 + 126 + 1152) \times 9 = 11520$	$46 - (2 + 126 + 1152 + 11520) \times 9 = 11520$
$8 - 2 \times 9 = 18$	$21 - (2 + 144) \times 3 = 1314$	$34 - (2 + 144 + 1314) \times 9 = 13140$	$47 - (2 + 144 + 1314 + 13140) \times 9 = 13140$
$9 - 2 \times 9 = 18$	$22 - (2 + 162) \times 3 = 1476$	$35 - (2 + 162 + 1476) \times 9 = 14760$	$48 - (2 + 162 + 1476 + 14760) \times 9 = 14760$
$10 - 2 \times 9 = 18$	$23 - (2 + 180) \times 3 = 1638$	$36 - (2 + 180 + 1638) \times 9 = 16380$	$49 - (2 + 180 + 1638 + 16380) \times 9 = 16380$
$11 - 2 \times 9 = 18$	$24 - (2 + 198) \times 3 = 1800$	$37 - (2 + 198 + 1800) \times 9 = 18000$	$50 - (2 + 198 + 1800 + 18000) \times 9 = 18000$
$12 - 2 \times 9 = 18$	$25 - (2 + 216) \times 3 = 1962$	$38 - (2 + 216 + 1962) \times 9 = 19620$	$51 - (2 + 216 + 1962 + 19620) \times 9 = 19620$
$13 - 2 \times 9 = 18$	$26 - (2 + 234) \times 3 = 2124$	$39 - (2 + 234 + 2124) \times 9 = 21240$	$52 - (2 + 234 + 2124 + 21240) \times 9 = 21240$

Cuadro 8. Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 15 recién nacidos por lombriz.

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	De la 40ª a la 52 semana
$1 - 2 \times 15 = 30$	$14 - (2 + 30) \times 15 = 480$	$27 - (2 + 30 + 480) \times 15 = 7680$	$27 - (2 + 30 + 480 + 7680) \times 15 = 12288$
$2 - 2 \times 15 = 30$	$15 - (2 + 60) \times 15 = 930$	$28 - (2 + 60 + 930) \times 15 = 14880$	$28 - (2 + 60 + 930 + 14880) \times 15 = 23808$
$3 - 2 \times 15 = 30$	$16 - (2 + 90) \times 15 = 1380$	$29 - (2 + 90 + 1380) \times 15 = 22080$	$29 - (2 + 90 + 1380 + 22080) \times 15 = 35328$
$4 - 2 \times 15 = 30$	$17 - (2 + 120) \times 15 = 1830$	$30 - (2 + 120 + 1830) \times 15 = 29280$	$30 - (2 + 120 + 1830 + 29280) \times 15 = 46848$
$5 - 2 \times 15 = 30$	$18 - (2 + 150) \times 15 = 2280$	$31 - (2 + 150 + 2280) \times 15 = 36480$	$31 - (2 + 150 + 2280 + 36480) \times 15 = 58368$
$6 - 2 \times 15 = 30$	$19 - (2 + 180) \times 15 = 2730$	$32 - (2 + 180 + 2730) \times 15 = 43680$	$32 - (2 + 180 + 2730 + 43680) \times 15 = 69888$
$7 - 2 \times 15 = 30$	$20 - (2 + 210) \times 15 = 3180$	$33 - (2 + 210 + 3180) \times 15 = 50880$	$33 - (2 + 210 + 3180 + 50880) \times 15 = 81408$
$8 - 2 \times 15 = 30$	$21 - (2 + 240) \times 15 = 3630$	$34 - (2 + 240 + 3630) \times 15 = 58080$	$34 - (2 + 240 + 3630 + 58080) \times 15 = 92928$
$9 - 2 \times 15 = 30$	$22 - (2 + 270) \times 15 = 4080$	$35 - (2 + 270 + 4080) \times 15 = 65280$	$35 - (2 + 270 + 4080 + 65280) \times 15 = 104448$
$10 - 2 \times 15 = 30$	$23 - (2 + 300) \times 15 = 4530$	$36 - (2 + 300 + 4530) \times 15 = 72480$	$36 - (2 + 300 + 4530 + 72480) \times 15 = 115968$
$11 - 2 \times 15 = 30$	$24 - (2 + 330) \times 15 = 4980$	$37 - (2 + 330 + 4980) \times 15 = 79680$	$37 - (2 + 330 + 4980 + 79680) \times 15 = 127488$
$12 - 2 \times 15 = 30$	$25 - (2 + 360) \times 15 = 5430$	$38 - (2 + 360 + 5430) \times 15 = 86880$	$38 - (2 + 360 + 5430 + 86880) \times 15 = 139008$
$13 - 2 \times 15 = 30$	$26 - (2 + 390) \times 15 = 5880$	$39 - (2 + 390 + 5880) \times 15 = 94080$	$39 - (2 + 390 + 5880 + 94080) \times 15 = 150528$

Cuadro 9. Aumento de la población en el periodo de un año (52 semanas). Índice de reproducción medio: 21 recién nacidos por lombriz.

de la 1ª a la 13ª semana	de la 14ª a la 26ª semana	de la 27ª a la 39ª semana	de la 40ª a la 52ª semana
$1 - 2 \times 21 = 42$	$14 - (2 + 42) \times 21 = 924$	$27 - (2 + 42 + 924) \times 21 = 20328$	$40 - (2 + 42 + 924 + 20328) \times 21 = 447216$
$2 - 2 \times 21 = 42$	$15 - (2 + 84) \times 21 = 1806$	$28 - (2 + 84 + 1806) \times 21 = 39816$	$41 - (2 + 84 + 1806 + 39816) \times 21 = 875868$
$3 - 2 \times 21 = 42$	$16 - (2 + 126) \times 21 = 2688$	$29 - (2 + 126 + 2688) \times 21 = 59136$	$42 - (2 + 126 + 2688 + 59136) \times 21 = 1300992$
$4 - 2 \times 21 = 42$	$17 - (2 + 168) \times 21 = 3570$	$30 - (2 + 168 + 3570) \times 21 = 78540$	$43 - (2 + 168 + 3570 + 78540) \times 21 = 1727880$
$5 - 2 \times 21 = 42$	$18 - (2 + 210) \times 21 = 4452$	$31 - (2 + 210 + 4452) \times 21 = 98028$	$44 - (2 + 210 + 4452 + 98028) \times 21 = 2156532$
$6 - 2 \times 21 = 42$	$19 - (2 + 252) \times 21 = 5334$	$32 - (2 + 252 + 5334) \times 21 = 117348$	$45 - (2 + 252 + 5334 + 117348) \times 21 = 2581656$
$7 - 2 \times 21 = 42$	$20 - (2 + 294) \times 21 = 6216$	$33 - (2 + 294 + 6216) \times 21 = 136752$	$46 - (2 + 294 + 6216 + 136752) \times 21 = 3008544$
$8 - 2 \times 21 = 42$	$21 - (2 + 336) \times 21 = 7056$	$34 - (2 + 336 + 7056) \times 21 = 155274$	$47 - (2 + 336 + 7056 + 155274) \times 21 = 3416028$
$9 - 2 \times 21 = 42$	$22 - (2 + 378) \times 21 = 7980$	$35 - (2 + 378 + 7980) \times 21 = 175560$	$48 - (2 + 378 + 7980 + 175560) \times 21 = 3862320$
$10 - 2 \times 21 = 42$	$23 - (2 + 420) \times 21 = 8862$	$36 - (2 + 420 + 8862) \times 21 = 194964$	$49 - (2 + 420 + 8862 + 194964) \times 21 = 4289208$
$11 - 2 \times 21 = 42$	$24 - (2 + 462) \times 21 = 9744$	$37 - (2 + 462 + 9744) \times 21 = 214368$	$50 - (2 + 462 + 9744 + 214368) \times 21 = 4716096$
$12 - 2 \times 21 = 42$	$25 - (2 + 504) \times 21 = 10626$	$38 - (2 + 504 + 10626) \times 21 = 233772$	$51 - (2 + 504 + 10626 + 233772) \times 21 = 5142984$
$13 - 2 \times 21 = 42$	$26 - (2 + 546) \times 21 = 11508$	$39 - (2 + 546 + 11508) \times 21 = 253176$	$52 - (2 + 546 + 11508 + 253176) \times 21 = 5569872$

Apéndice 3

DOCUMENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

(01)	Adulto1= INTEG (+Sobrevi12-Mort13, 2) Units: lombrices	Units: 1/semanas
(02)	AdultosTotales= Adulto1*Corrector3 Units: lombrices/semanas	
(03)	Cocon1= INTEG (+Natalidad-Mort1-Sobrev1, 0) Units: cocones	(13) Fact3= 1 Units: 1/semanas
(04)	Cocon2= INTEG (+Sobrev1-Mort2-Sobrev2, 0) Units: cocones	(14) Fact4= 1 Units: 1/semanas
(05)	Cocon3= INTEG (+Sobrev2-Mort3-Sobrev3, 0) Units: cocones	(15) Fecundidad= 1 Units: cocones/lombrices
(06)	CoconesTotales= (Cocon1+Cocon2+Cocon3)*Correc tor de Unidades Units: cocones/semanas	(16) FINAL TIME = 54 Units: semanas The final time for the simulation.
(07)	Corrector de Unidades= 1 Units: 1/semanas	(17) FraccAdultos= AdultosTotales/PoblaciónTotal Units: Dimensionless
(08)	Corrector1= 1 Units: 1/semanas	(18) FraccCocones= (CoconesTotales/PoblaciónTotal)* Unidades Units: Dimensionless
(09)	Corrector2= 1 Units: 1/semanas	(19) FraccJuveniles= (JuvenilesTotales/PoblaciónTotal) Units: Dimensionless
(10)	Corrector3= 1 Units: 1/semanas	(20) FraccSubAdulto= SubAdultosTotales/PoblaciónTotal Units: Dimensionless
(11)	Fact1= 1 Units: 1/semanas	(21) INITIAL TIME = 0 Units: semanas The initial time for the simulation.
(12)	Fact2= 1	(22) Juvenil1= INTEG (+Sobrev4-Mort5-Sobrev5, 0) Units: lombrices
		(23) Juvenil2= INTEG (+Sobrev5-Mort6-Sobrev6, 0) Units: lombrices

- (24) $Juvenil3 = INTEG (+Sobrev6 - Mort7 - Sobrevi7, 0)$
Units: lombrices
- (25) $Juvenil4 = INTEG (+Sobrevi7 - Mort8 - Sobrevi8, 0)$
Units: lombrices
- (26) $JuvenilesTotales = (Rnacidos + Juvenil1 + Juvenil2 + Juvenil3 + Juvenil4) * Corrector1$
Units: lombrices/semanas
- (27) $Mort1 = (Fact1 - Supervi1) * Cocon1$
Units: cocones/semanas
- (28) $Mort10 = (Fact3 - Supervi11) * SubAdulto2$
Units: lombrices/semanas
- (29) $Mort11 = (Fact3 - Supervi12) * SubAdulto3$
Units: lombrices/semanas
- (30) $Mort12 = (Fact3 - Supervi13) * SubAdulto4$
Units: lombrices/semanas
- (31) $Mort13 = (Fact4 - Supervi14) * Adulto1$
Units: lombrices/semanas
- (32) $Mort2 = (Fact1 - Supervi2) * Cocon2$
Units: cocones/semanas
- (33) $Mort3 = (Fact1 - Supervi3) * Cocon3$
Units: cocones/semanas
- (34) $Mort4 = (Fact2 - Supervi4) * Rnacidos$
Units: lombrices/semanas
- (35) $Mort5 = (Fact2 - Supervi5) * Juvenil1$
Units: lombrices/semanas
- (36) $Mort6 = (Fact2 - Supervi6) * Juvenil2$
Units: lombrices/semanas
- (37) $Mort7 = (Fact2 - Supervi7) * Juvenil3$
Units: lombrices/semanas
- (38) $Mort8 = (Fact2 - Supervi8) * Juvenil4$
Units: lombrices/semanas
- (39) $Mort9 = (Fact3 - Supervi9) * SubAdult1$
Units: lombrices/semanas
- (40) $Mortalidad = Mort1 + Mort2 + Mort3$
Units: cocones/semanas
- (41) $Nacimientos = TasaEclosión * SobrvCocon3$
Units: lombrices/semanas
- (42) $Natalidad = SobreAdulto1 * Fecundidad$
Units: cocones/semanas
- (43) $PoblaciónTotal = JuvenilesTotales + SubAdultosTotales + AdultosTotales$
Units: lombrices/semanas
- (44) $Rnacidos = INTEG (+Nacimientos - Mort4 - Sobrev4, 0)$
Units: lombrices
- (45) **SAVEPER = TIME STEP**
Units: semanas [0, ?]
The frequency with which output is stored.
- (46) $SobreAdulto1 = Adulto1 * Supervi14$
Units: lombrices/semanas
- (47) $Sobrev1 = Cocon1 * Supervi1$
Units: cocones/semanas

- (48) Sobrev2=
 $\text{Cocon2} * \text{Supervi2}$
 Units: cocones/semanas
- (49) Sobrev3=
 $\text{Cocon3} * \text{Supervi3}$
 Units: cocones/semanas
- (50) Sobrev4=
 $\text{Rnacidos} * \text{Supervi4}$
 Units: lombrices/semanas
- (51) Sobrev5=
 $\text{Juvenil1} * \text{Supervi5}$
 Units: lombrices/semanas
- (52) Sobrev6=
 $\text{Juvenil2} * \text{Supervi6}$
 Units: lombrices/semanas
- (53) Sobrevi10=
 $\text{SubAdulto2} * \text{Supervi11}$
 Units: lombrices/semanas
- (54) Sobrevi11=
 $\text{SubAdulto3} * \text{Supervi12}$
 Units: lombrices/semanas
- (55) Sobrevi12=
 $\text{SubAdulto4} * \text{Supervi13}$
 Units: lombrices/semanas
- (56) Sobrevi7=
 $\text{Juvenil3} * \text{Supervi7}$
 Units: lombrices/semanas
- (57) Sobrevi8=
 $\text{Juvenil4} * \text{Supervi8}$
 Units: lombrices/semanas
- (58) Sobrevi9=
 $\text{SubAdutl1} * \text{Supervi9}$
 Units: lombrices/semanas
- (59) SobrvCocon3=
 $\text{Cocon3} * \text{Supervi3}$
 Units: cocones/semanas
- (60) SubAdulto2= INTEG (
 +Sobrevi9-Mort10-
 Sobrevi10,
 0)
 Units: lombrices
- (61) SubAdulto3= INTEG (
 $\text{+Sobrevi10-Mort11-}$
 Sobrevi11,
 0)
 Units: lombrices
- (62) SubAdulto4= INTEG (
 $\text{+Sobrevi11-Mort12-}$
 Sobrevi12,
 0)
 Units: lombrices
- (63) SubAdultosTotales=
 $(\text{SubAdulto2} + \text{SubAdulto3} + \text{SubAdu}$
 $\text{lto4} + \text{SubAdutl1}) * \text{Corrector2}$
 Units: lombrices/semanas
- (64) SubAdutl1= INTEG (
 $\text{+Sobrevi8-Mort9-Sobrevi9,}$
 0)
 Units: lombrices
- (65) Superv1=
 0.7
 Units: 1/semanas
- (66) Supervi11=
 0.91
 Units: 1/semanas
- (67) Supervi12=
 0.91
 Units: 1/semanas
- (68) Supervi13=
 0.91
 Units: 1/semanas
- (69) Supervi14=
 0.988
 Units: 1/semanas
- (70) Supervi2=
 0.8
 Units: 1/semanas
- (71) Supervi3=
 0.9
 Units: 1/semanas
- (72) Supervi4=
 0.7
 Units: 1/semanas
- (73) Supervi5=
 0.8

- Units: 1/semanas
- (74) Supervi6=
0.9
Units: 1/semanas
- (75) Supervi7=
0.9
Units: 1/semanas
- (76) Supervi8=
0.91
Units: 1/semanas
- (77) Supervi9=
0.91
Units: 1/semanas
- (78) TasaEclosión=
21
Units: lombrices/cocones
- (79) TIME STEP = 1
Units: semanas [0,?]
The time step for the simulation.
- (80) Unidades=
1
Units: lombrices/cocones