

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

SIMULACIÓN DE APLICACIÓN DE UN ROBOT FORESTADOR

Ing. Bukovits, Agustín Alan – LU 1045132

Programa Conjunto Ingeniería Industrial e Ingeniería
Electromecánica

Ing. Nuñez Romagnoli, Santiago Daniel – LU 1046382

Programa Conjunto Ingeniería Industrial e Ingeniería
Electromecánica

Tutor:

Zambrano, Daniel Alberto, UADE

Octubre 22, 2018



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla el análisis de la implementación de un robot forestador. Se evalúan los aspectos económicos y financieros resultantes de la implementación de las tecnologías de robot forestador desarrolladas en el Proyecto Final de Ingeniería “Diseño y Desarrollo de un Robot Forestador”.

Se describe de forma general la problemática del caso a abordar. Acorde a las características descriptas, se definen las metodologías de modelado y simulación a utilizar. Posteriormente se define el software para el desarrollo del caso.

Se estudian las características generales de las actividades forestales estándar. Se individualizan y describen las variables que intervienen en dichas actividades y se realizan los cálculos pertinentes para facilitar su utilización dentro de un modelo.

Se desarrolla un modelo esquemático acorde a las actividades y variables descriptas. Así mismo, se agregan y detallan nuevas variables para el correcto funcionamiento de la modelización al momento de simularla.

Finalmente, se realizan las simulaciones pertinentes en diferentes escenarios definidos. Se efectúan comparaciones entre los aspectos más relevantes de cada contexto y se confeccionan conclusiones de posibles resultados de la implementación de tecnologías de robot forestador.

Abstract

In the following project, an analysis of the implementation of a forestry robot is developed. The economics and financial aspects resulting from the implementation of the forestry robot technologies are evaluated. These technologies were developed in the Final Project of Engineering titled “Diseño y Desarrollo de Robot Forestador”.

The main aspects of the case treated are described. Regarding the case, the methodologies used of modelling and simulation are defined. Subsequently, the software for the development of the case is defined.

The general features of standard forestry activities are studied. At the same time, the main variables are individualized and described. In order to facilitate the use of these variables within a model, the relevant calculation is made.

According to the described activities and variables, a schematic model is developed. Likewise, new variables are added and detailed for the proper operation of the modeling when in simulation.

Finally, pertinent simulations are run in different defined scenarios. Comparisons between the most relevant aspects of each context are made. A conclusion is made out of possible results of the implementation of forestry robot technologies.

Tabla de Contenidos

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA 1

Resumen 2

Abstract..... 3

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO 6

 1.1 Introducción 6

 1.2 Marco Teórico..... 7

 1.2.1 Diagrama de Influencias..... 7

 1.2.2 Diagrama de Forrester 10

 1.3 Simulador Vensim 11

 1.4 Descripción de los procesos a estudiar 11

CAPÍTULO 2: DESARROLLO 12

 2.1 Análisis de variables 12

 2.1.1 Supuestos..... 12

 2.1.2 Variables..... 13

 2.2 Descripción del problema 15

 2.3 Diagrama de Influencia..... 16

 2.4 Bucles presentes..... 17

 2.5 Diagrama de Forrester..... 19

 2.6 Simulación 25

 2.6.1 1 Operario y 0 Robots 25

 2.6.2 1 Robot y 0 Operarios 28

 2.6.3 1 Robot y 1 Operario..... 31

CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES 33

BIBLIOGRAFÍA 34

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ejemplo de Diagrama de Influencias. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE 7

Ilustración 2. Descripción mínima de un sistema. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE 8

Ilustración 3. Formato del Diagrama Causal. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE 8

Ilustración 4. Sistema con punto de equilibrio inestable. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE 9

Ilustración 5. Sistema con punto de equilibrio estable. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE 9

Ilustración 6. Diagrama de Influencias de la Simulación de Aplicación de Robot Forestador. Fuente: Elaboración propia..... 16

Ilustración 7. Bucle R1. Fuente: Elaboración propia..... 17

Ilustración 8. Bucle R2. Fuente: Elaboración propia..... 17

Ilustración 9. Bucles B1, B2, B3, B4 y B5. Fuente: Elaboración propia 18

Ilustración 10. Diagrama de Forrester de la Simulación de Aplicación de Robot Forestador. Fuente: Elaboración propia..... 19

Ilustración 11. Plantación con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia..... 25

Ilustración 12. Unidades plantadas con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia 25

Ilustración 13. Árboles jóvenes con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia 26

Ilustración 14. Árboles adultos con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia 26

Ilustración 15. Utilidades, costos e ingresos con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia..... 27

Ilustración 16. Plantación con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia..... 28

Ilustración 17. Unidades plantadas con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia 28

Ilustración 18. Árboles jóvenes con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia 29

Ilustración 19. Árboles adultos con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia 29

Ilustración 20. Utilidades, costos e ingresos con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia..... 30

Ilustración 21. Plantación, unidades plantadas, árboles jóvenes y árboles adultos con 1 robot y 1 operario. Fuente: Elaboración propia 31

Ilustración 22. Utilidades, costos e ingresos con 1 robot y 1 operario. Fuente: Elaboración propia..... 32

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

Este proyecto tiene como finalidad obtener un mayor entendimiento de los resultados de la implementación de tecnologías de robot forestador en la actividad forestal. Para tal fin, se decidió confeccionar un modelo de simulación por computadora acorde a las particularidades presentes en esta actividad. Por esto se buscará realizar comparaciones pertinentes entre las tareas y características de las actividades forestales desarrolladas de manera actual (manual) y las posibles características adoptadas una vez implementadas las tecnologías nombradas.

La modelización será llevada a cabo utilizando las características generales de una actividad forestal estándar y siguiendo los parámetros definidos por la metodología escogida para desarrollar la simulación.

Mediante la ejecución de las simulaciones del modelo a confeccionar, se esperan obtener indicadores que permitan la toma de decisiones analizando los aspectos económicos y financieros.

1.2 Marco Teórico

A continuación, se desarrollará un breve marco teórico acerca de la metodología de simulación escogida para el desarrollo del proyecto. Los criterios adoptados son los correspondientes a la dinámica de sistemas, que servirá como base para la simulación propuesta. Esta información fue recolectada del material perteneciente a la cátedra de “Dinámica de Sistemas” dictada por el Ing. Nahuel Romera, docente de UADE.

La dinámica de sistemas es una metodología para entender el cambio que se produce en los sistemas a través del tiempo, utilizando para ello las ecuaciones en diferencias finitas o ecuaciones diferenciales.

El comportamiento del sistema vendrá dado por el conjunto de las trayectorias de todas las variables, que suministran algo así como una narración de lo acontecido en el sistema.

1.2.1 Diagrama de Influencias

El diagrama de influencias o diagrama causal es una representación gráfica que describe el comportamiento del sistema en referencia a la conformación de su estructura.

La descripción mínima de un sistema viene dada por la especificación de las distintas partes que lo forman, mediante el conjunto “C” de su composición o partes y por las relaciones “R” que se establecen entre los elementos de “C”.

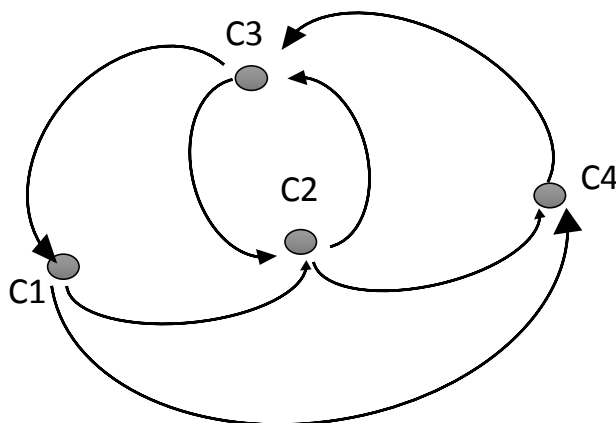


Ilustración 1. Ejemplo de Diagrama de Influencias. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE

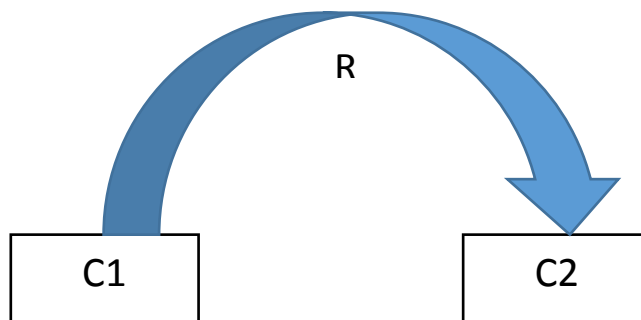


Ilustración 2. Descripción mínima de un sistema. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE

El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema y se representa mediante el diagrama de influencias o diagrama causal, cuyo formato es el siguiente:

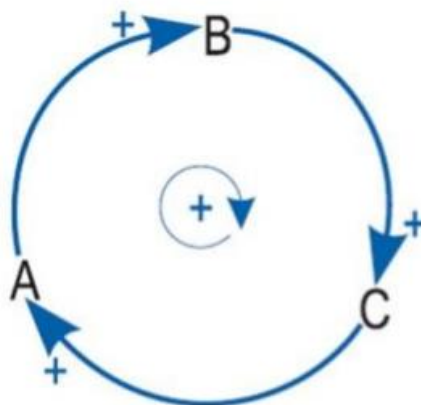


Ilustración 3. Formato del Diagrama Causal. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE

En su forma más simple, el diagrama de influencias o causal está formado por lo que se conoce como un grafo orientado. A las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo, este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo.

Supongamos que entre "A" y "B" existe una relación de influencia positiva, se puede decir que la relación es directamente proporcional y se representa como:

$$A \longrightarrow +B$$

Supongamos que entre "A" y "B" existe una relación de influencia negativa, se puede decir que la relación es inversamente proporcional y se representa como:

$$A \longrightarrow -B$$

Un sistema que presenta un punto de equilibrio INESTABLE posee realimentación positiva, ya que cualquier variación por mínima que sea, hace que el sistema se aleje de ese estado de equilibrio.

Por ejemplo, un sistema mecánico compuesto por una esfera sobre el vértice de un cono, puede alcanzar una posición de equilibrio pero es altamente inestable.

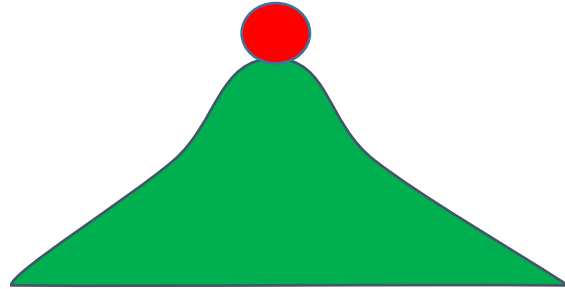


Ilustración 4. Sistema con punto de equilibrio inestable. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE

Un sistema que presenta un punto de equilibrio ESTABLE posee realimentación negativa, ya que cualquier variación por mínima que sea, tiende a ser corregida, y por tanto equilibrada por el sistema.

Por ejemplo, un sistema mecánico compuesto por una esfera sobre la base de un cono, puede alcanzar una posición de equilibrio y por más que se ejerza sobre ella un efecto de repulsión, ésta tenderá nuevamente al punto de equilibrio por la propia estructura del sistema.

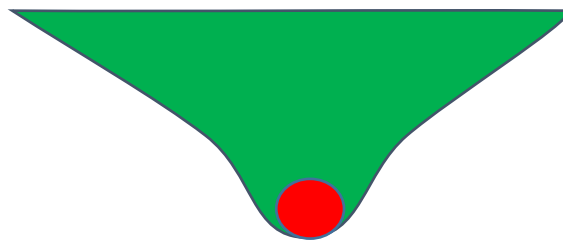


Ilustración 5. Sistema con punto de equilibrio estable. Fuente: Material "Dinámica de Sistemas" UADE


Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación.


Un retraso en un loop negativo produce oscilaciones amortiguadas.


1.2.2 Diagrama de Forrester

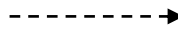
Los diagramas de Forrester proporcionan una representación gráfica de los sistemas dinámicos, modelando cualitativa y cuantitativamente las relaciones entre las partes mediante símbolos que corresponden a una interpretación hidrodinámica del sistema.

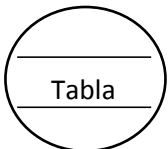
Generalmente los diagramas de Forrester expresan en un conjunto de símbolos gráficos lo que se expresa en un diagrama causal y que puede ser incorporado en un programa de simulación de sistemas dinámicos.


Nivel

Indica en qué estado se encuentra el sistema. Los niveles cambian sus valores acumulando o integrando las tasas de flujo.

Tasa de flujo

Indican la cantidad de material o información que se permite pasar durante la unidad de tiempo establecida.

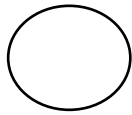
Flujo de Materiales

Indica la proveniencia y la dirección hacia donde se dirige el material.

Flujo de Información

Indica la proveniencia y la dirección hacia donde se dirige la información.

Función o Tabla

Se utiliza para representar no linealidades.

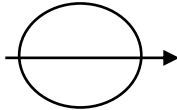
Fuente o Sumidero

Representan fuentes o sumideros de materiales o información.

Variable Auxiliar



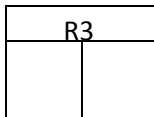
Permiten establecer pasos intermedios en el flujo de información/material, o introducir variables exógenas al sistema.

Parámetro



Son las constantes del modelo y pueden ser índices, estadísticos o promedios.

Retardo



Representan los lapsos de tiempo hasta que se produce una acción o demoras en la transferencia de información. (Ing. Romera, 2018)

1.3 Simulador Vensim

Vensim es el software escogido a utilizar para el proyecto, el mismo es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas.

Además proporciona una forma simple y flexible de crear modelos de simulación, sea con diagramas causales o con diagramas de niveles y flujos.

1.4 Descripción de los procesos a estudiar

En esta sección nos dedicaremos a describir de forma general las tareas intervinientes a lo largo de una actividad forestal, las cuales serán descriptas y analizadas como variables utilizables para el modelo que posteriormente se desarrollará acorde a la metodología de dinámica elegida.

Según la información obtenida de las fuentes “Evaluación de costos de establecimientos y mantenimiento de plantaciones forestales comerciales” (CONAFOR, México) y “Boletín de precios de productos y servicios forestales” (INTA, Argentina), el proceso de actividades forestales puede resumirse en:

- Deshierbe: Eliminación de la vegetación espontánea.

- Preparación del terreno, posterior o simultánea al anterior. Este proceso consistirá en mover el terreno para facilitar la instalación, arraigo y desarrollo normal de la vegetación.
- Compra de árboles a plantar.
- Plantación
- Mantenimiento: incluye fertilización y control de plagas.
- Tala rasa: Los árboles son cortados en su totalidad desde la base.
- Venta de madera.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO

2.1 Análisis de variables

2.1.1 Supuestos

Para el diseño de modelo a simular se estableció que la actividad forestal incluirá únicamente arboles de la especie pinus elliotis, ya que al pertenecer a la familia de los pinos representaría un desarrollo óptimo de las tecnologías de robot forestador a analizar.

Se adoptó una densidad de árboles a plantar de 1600 por hectárea.

El tiempo de desarrollo adoptado para la plantación será de 13 años.

Las actividades de tala a desarrollar se presentarán en periodos de 8 y 13 años, de esta forma se define una porción de la plantación a ser talada de forma temprana para la obtención de primeros ingresos y una tala final del resto de los árboles en etapa adulta.

A modo de simplificar la modelización del proceso, se decidió contabilizar los costos de manera unitaria por árbol plantado.

La información de las variables obtenidas cuentan con unidades de moneda extranjera (pesos mexicanos) y argentina correspondientes a años anteriores, por lo cual se requiere realizar conversiones a un valor actual en pesos argentinos (junio 2018), utilizando como referencia la cotización del dólar en los distintos periodos.

Cotización del dólar estadounidense a peso mexicano noviembre 2011: \$13,62

Cotización del dólar estadounidense a peso argentino marzo 2015: \$8,73

Cotización del dólar estadounidense a peso argentino abril 2016: \$14,32

Cotización del dólar estadounidense a peso argentino junio 2018: \$25

Se asume que los costos y precios se mantendrán constantes a lo largo del tiempo.

2.1.2 Variables

- Deshierbe: en el material utilizado este proceso presenta un costo de 1250 \$MXN por hectárea.

A modo de poder utilizar este valor para el modelo a desarrollar se realizó la siguiente conversión:

$$1250 \frac{\$MXN}{Ha} * \frac{1}{13,62 \frac{\$MXN}{USD}} * 25 \frac{\$ARS}{USD} * \frac{1}{1600 \frac{\text{Árboles}}{Ha}} = 1,4 \frac{\$ARS}{Arbol}$$

- Preparación del terreno: en el material utilizado este proceso presenta un costo de 4864 \$MXN por hectárea. Lo que representaría un costo unitario de 5,58 \$ARS
- Compra de árboles: el precio por árbol considerado fue de 3,5 \$ARS (junio 2018).

Plantación:

- Mano de obra: Se toman en cuenta las siguientes variables:
 - Capacidad de empleado: La misma fue definida en 20 árboles por hora de acuerdo a lo explicado en el PFI tomado como base.
 - Cantidad de empleados: Se ofrece la posibilidad de variar la cantidad de empleados deseados para el modelo.
 - Salario mínimo: Se tomó un salario de 20000 \$ ARS de acuerdo al vigente en empleados rurales en junio 2018.
 - Jornada: se adoptó una jornada laboral de 8 horas diarias y 22 días por mes, dando un total de 176 horas mensuales.
 - Sueldo: estará definido por los parámetros anteriores.
- Robot: Se toman en cuenta las siguientes variables:
 - Capacidad de Robot: La misma fue definida en 100 árboles por hora de acuerdo a lo explicado en el PFI tomado como base.
 - Cantidad de robots: Se ofrece la posibilidad de variar la cantidad de robots deseados para el modelo.
 - Alquiler unitario: El mismo fue definido en 86800 \$ ARS por mes de acuerdo a actualizaciones de precios realizadas con datos de la PFI base.

- Fertilización: en el material utilizado este proceso tiene un costo de 2340 \$ MXN por hectárea, los cual representaría un costo unitario de 2,61 \$ARS por Árbol.
- Control de plagas: en el material utilizado este proceso tiene un costo de 160 \$ MXN por hectárea, los cual representaría un costo unitario de 0,178\$ARS por Árbol.
- Mantenimiento: estará definido por los parámetros de fertilización y control de plagas.
- Tala: En el material utilizado este proceso tiene un costo medio de 166 \$ARS/Tn (junio 2018). Para la definición del costo unitario por árbol se toman en cuenta los siguientes aspectos.
 - Volumen de cosecha: se definirán dos volúmenes por unidad talada, ya que se definen dos etapas de tala, una temprana y una tardía, las cuales aportan a la plantación diferentes tiempos de maduración para los árboles.
 - Volumen árboles jóvenes: puede estimarse en 0,17m³ por árbol acorde a la información presente en la bibliografía.
 - Volumen árboles adultos: Se define de la misma forma que el anterior, dando un volumen de 0,39 m³ por árbol.
 - Densidad de madera: acorde con información del Instituto nacional de tecnología industrial la densidad de la madera correspondiente a pinos elioti es de 0,51 Tn/m³.
 - Costo tala joven: se define como el costo correspondiente a la tala de árboles jóvenes, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\text{costo tala joven} = 0,17 \frac{\text{m}^3}{\text{arbol}} * 0,51 \frac{\text{Tn}}{\text{m}^3} * 166 \frac{\text{\$ARS}}{\text{TN}} = 14,39\text{\$ARS},$$
 - Costo tala adulta: se define de igual manera que la tala joven, lo cual da un costo de 33 \$ARS
- Venta: Para estimar los ingresos por venta obtenidos por la tala rasa se definieron los diferentes factores intervinientes en el cálculo, los cuales corresponden a los mismos utilizados en el coto de tala.
 - Volumen de cosecha.
 - Densidad de madera.

- Precio de venta de madera por tonelada: El precio de venta considerado fue de 420 \$ ARS por tonelada de madera (año 2016), lo que da como resultado un precio de venta de 733 \$ARS por tonelada en el año 2018.

2.2 Descripción del problema

Con el fin de lograr los objetivos descriptos, se realizará el desarrollo de un panorama general asociado a las actividades forestales correspondientes a pinos eliotis.

El funcionamiento de este sistema parte de la existencia de una superficie o terreno a trabajar (hectárea disponibles), la cual contará con un valor inicial modificable de 100Ha. Se realizarán plantaciones de plantines de árboles a un ritmo definido por la capacidad de plantación presente en la mano de obra o en la utilización del robot. Los plantines jóvenes irán ocupando superficie de terreno a la espera de un tiempo de desarrollo hasta llegar a una etapa de árboles jóvenes (8 años). En esta etapa, un porcentaje de árboles será talada para la obtención de un ingreso primario, mientras que el resto se encontrará en otra espera para llegar a la madurez (árboles adultos 13 años). Se le asignará un tiempo de asentamiento a los árboles adultos anterior a su tala final. Los dos procesos de tala mencionados devolverán terreno disponible para volver a trabajar.

Para la obtención de información útil para la toma de decisiones, se deberá recolectar información en base de los costos e ingresos generales del proyecto.

Al proceso de plantación anteriormente mencionado se le atribuyen diferentes gastos como lo son el alquiler del robot y los sueldos de la mano de obra (si corresponden), costos por compra de árboles, preparación del terreno, costos por deshierbe. Por otro lado, la existencia de unidades plantadas, árboles jóvenes y adultos, generan un costo de mantenimiento periódico, el cual se repite año a año. Estos costos incluyen fertilización y control de plagas. Por último, las actividades de tala, tanto la de árboles jóvenes como de adultos presentan costos por actividad.

Los ingresos presentes en este proyecto sólo se presentarán por parte de las actividades de tala. El monto de ingresos obtenido por árbol dependerá del precio en el mercado y de las características generales de los árboles a las edades planteadas.

Los utilidades obtenidas a lo largo del proyecto se observarán como resultado de la interacción de los costos con los ingresos presentados.

2.3 Diagrama de Influencia

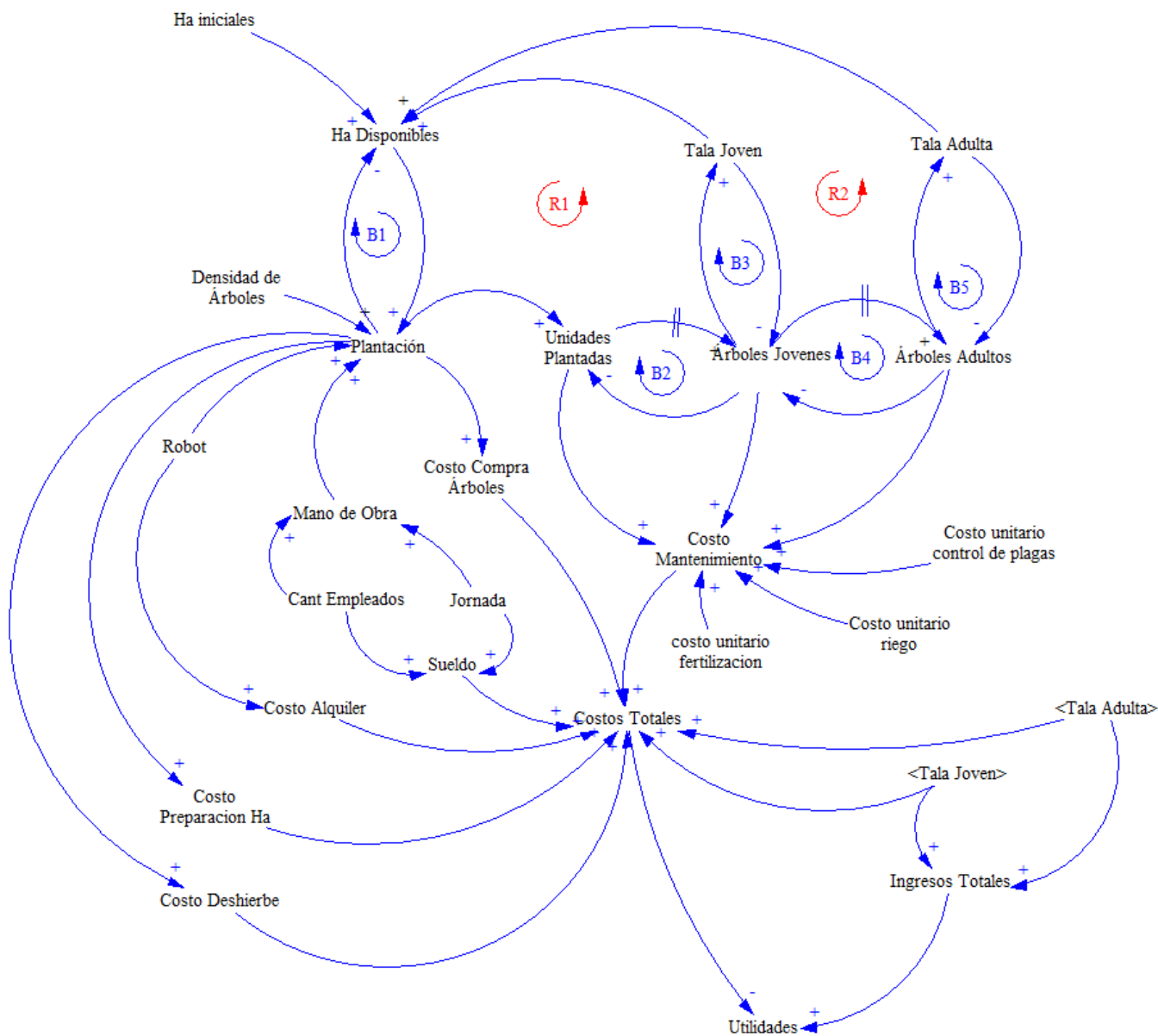


Ilustración 6. Diagrama de Influencias de la Simulación de Aplicación de Robot Forestador. Fuente: Elaboración propia

2.4 Bucles presentes

Como puede verse en el diagrama de influencia, debido a la formulación del problema quedan definidos dos realimentaciones positivas (reforce) y cinco realimentaciones negativas (balance). A continuación se presentan una descripción de las mismas y posibles hipótesis dinámicas asociadas.

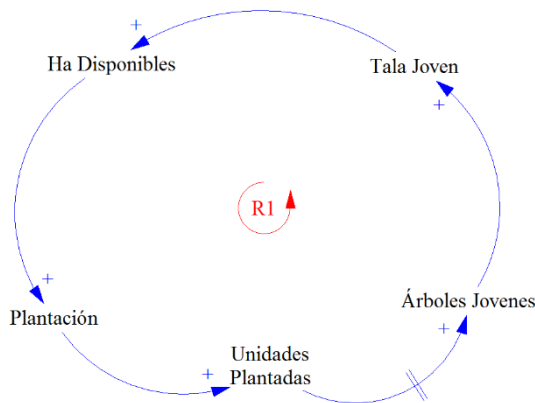


Ilustración 7. Bucle R1. Fuente: Elaboración propia

El bucle R1 de longitud 4 explica que a mayor cantidad de árboles talados en su período de juventud genera una mayor cantidad de hectáreas disponibles y por lo tanto genera un ciclo económico de cobro rápido pero de poco rendimiento debido al volumen generado.

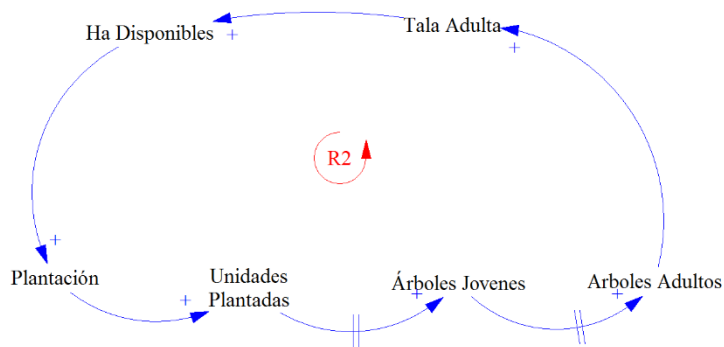


Ilustración 8. Bucle R2. Fuente: Elaboración propia

El bucle R2 de longitud 5, al igual que el anterior, explica que a mayor cantidad de árboles talados en etapa adulta genera una mayor cantidad de hectáreas disponibles. El ciclo económico presente en este caso es más largo ya que se presentan dos retrasos pero de mayor rendimiento debido a que los volúmenes generados son mayores.

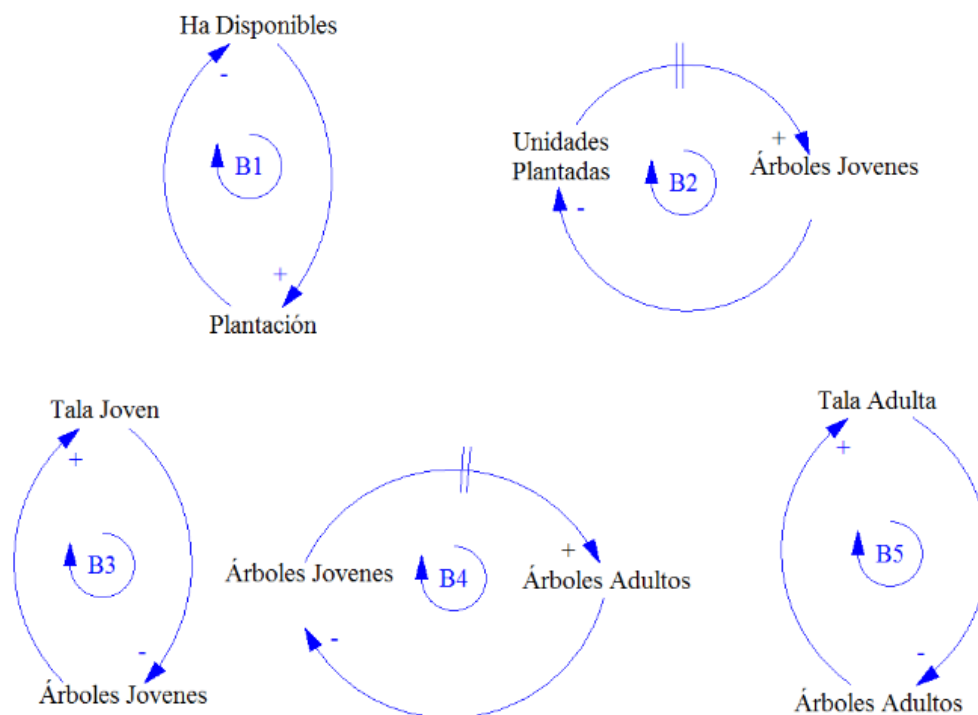


Ilustración 9. Bucles B1, B2, B3, B4 y B5. Fuente: Elaboración propia

El bucle B1 de longitud “1” explica que partiendo de una cantidad de hectáreas disponibles, éstas se irán ocupando por el proceso de plantación, el cual tiene un comportamiento lineal hasta la ocupación total del terreno, en este punto la variable plantación se anulará.

El bucle B2 de longitud “1” explica que las unidades plantadas en existencia esperarán un período de tiempo definido antes de considerarse árboles jóvenes. Cuando esto sucede, dejan de formar parte del grupo de unidades plantadas.

El bucle B3 de longitud “1” explica que del total de los árboles pertenecientes al grupo de jóvenes, un porcentaje de éstos serán talados, lo que generará un aumento en la tala y una disminución de árboles jóvenes.

El bucle B4 de longitud “1” explica que al igual como pasó con el bucle 2, posterior a una espera determinada, la población de árboles jóvenes pasará a formar parte de los árboles adultos, aumentando el número de estos últimos y disminuyendo la cantidad de ejemplares jóvenes.

El bucle B5 de longitud “1” explica que la totalidad de árboles existentes en la población adulta serán talados, por lo que una mayor cantidad de árboles adultos dará como resultado una mayor tala, y ésta dará como resultado la eliminación de la población de árboles adultos en su existencia actual.

2.5 Diagrama de Forrester

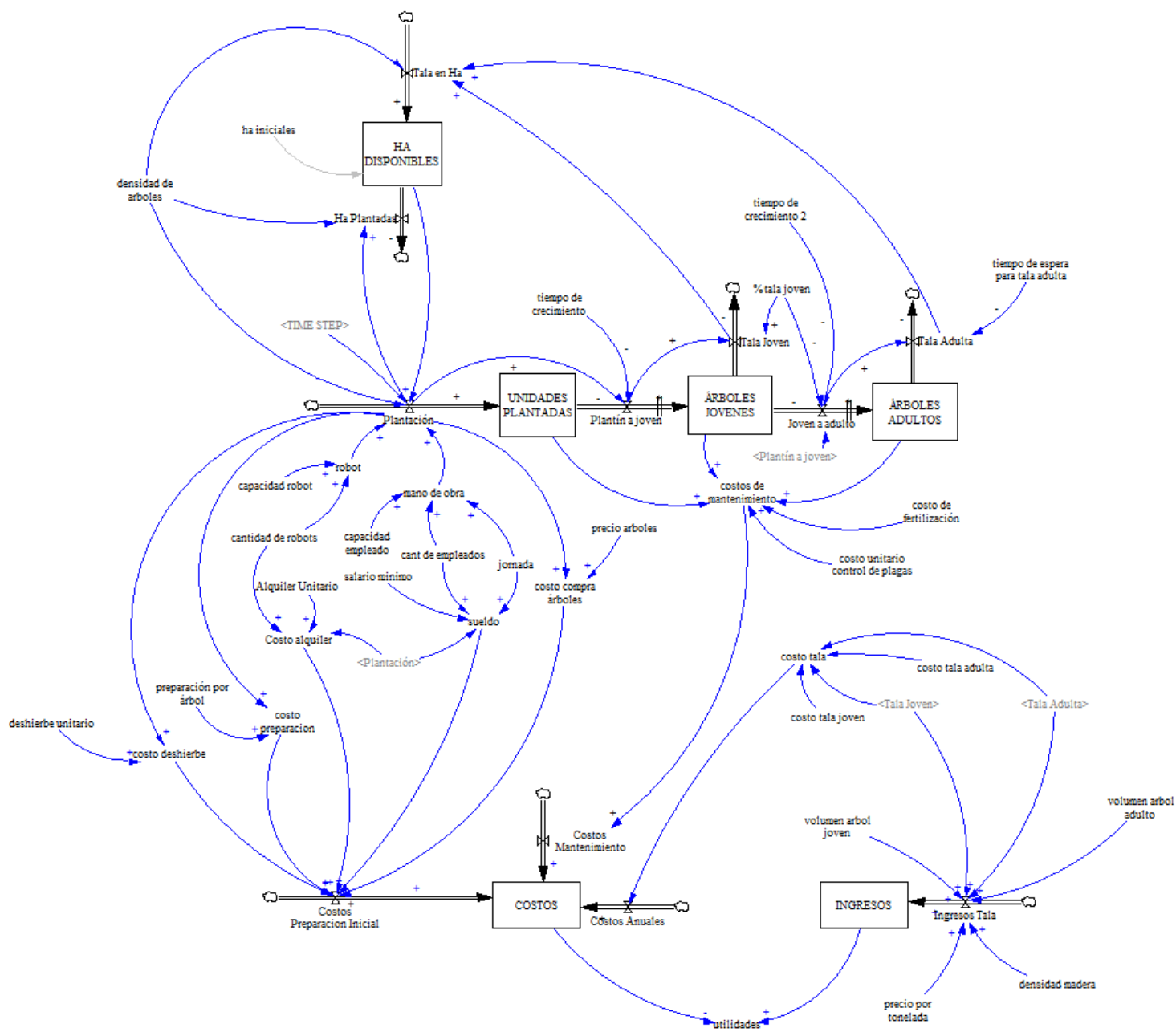


Ilustración 10. Diagrama de Forrester de la Simulación de Aplicación de Robot Forestador. Fuente: Elaboración propia

Para la representación del modelo en un diagrama de Forrester se necesitaron definir las variables de nivel y flujos intervinientes en los desarrollos de funcionamiento normal del diagrama. A continuación, se detallan las variables de nivel con sus correspondientes flujos y funciones:

- **HA DISPONIBLES:** Esta variable de nivel representa la superficie de terreno existente y disponible para la realización de las plantaciones. Se partirá de un valor inicial definido para trabajar, el cual irá disminuyendo al desarrollarse la actividad de plantación hasta agotar la superficie. La recuperación de terreno disponible se obtendrá como resultado de las actividades de tala más avanzada la simulación, lo que permitirá una nueva ejecución de las actividades de plantación.

$$\frac{dHA \text{ DISPONIBLE}}{dt} = Tala \text{ en Ha} - Ha \text{ Plantadas}$$

$$HA \text{ DISPONIBLE}(T = 0) = 100HA$$

- **Ha Plantadas:** esta variable de flujo regula la cantidad de hectáreas que son trabajadas y por lo cual ya no están disponibles. Este flujo depende de la variable plantación y la densidad de árboles seleccionada para trabajar.

$$Ha \text{ Plantadas} = \frac{Plantación}{densidad \text{ de árboles}}$$

- **Tala en Ha:** este flujo está definido por las actividades de talas desarrollado a lo largo de toda la simulación, las cuales son transformadas en hectáreas taladas utilizando la variable densidad de árboles.

$$Tala \text{ en HA} = \frac{Tala \text{ Joven} + Tala \text{ Adulta}}{densidad \text{ de árboles}}$$

- **UNIDADES PLANTADAS:** Esta variable de nivel representa la cantidad de árboles colocados en el terreno trabajado. El incremento de este nivel se encuentra definido por la variable de flujo de plantación, la cual dependiendo de su valor las unidades plantadas aumentarán a una mayor o menor velocidad. Por otro lado, la

disminución del nivel lo regula un flujo nombrado “Plantín a Joven”. Éste define un tiempo de espera (8 años) a partir de la llegada de los árboles al nivel para pasar a la siguiente etapa.

$$\frac{dUNIDADES PLANTADAS}{dt} = Plantación - Plantín a Joven$$

$$UNIDADES PLANTADAS(T = 0) = 0$$

- Plantación: Esta variable de flujo define el ritmo de plantación de árboles, siempre y cuando existan hectáreas disponibles para la operación. La velocidad de plantación se define acorde a si se ha implementado mano de obra manual o un robot. A continuación, se plantea la función “plantación” acorde a los parámetros del software Vensim.

$$Plantación = IF THEN ELSE\left(\frac{HA DISPONIBLES * densidad de arboles}{TIME STEP} \geq mano de obra + robot, \frac{HA DISPONIBLES * densidad de arboles}{TIME STEP}, \frac{HA DISPONIBLES * densidad de arboles}{TIME STEP}\right)$$

- Plantín a Joven: este flujo define el ritmo de salida o disminución de la variable de nivel acorde al tiempo de desarrollo definido. La fórmula correspondiente a esta variable es la siguiente:

$$Plantín a Joven = DELAY FIXED(Plantación, tiempo de crecimiento, 0)$$

- **ÁRBOLES JOVENES:** Esta variable de nivel es la inmediata posterior a unidades plantadas. Los flujos de salida definidos para la variable anterior son considerados de entrada para este término. Este nivel cuenta con dos flujos de salidas, uno correspondiente a otro tiempo de espera o maduración para la etapa adulta y otro definido por la actividad de tala en árboles jóvenes.

$$\frac{dÁRBOLES JÓVENES}{dt} = Plantín a Joven - (Tala Joven + Joven a Adulto)$$

ÁRBOLES JÓVENES(T = 0) = 0

- Plantín a Joven: Flujo de entrada definido por el flujo de salida de la variable de nivel anterior.
- Tala joven: variable de flujo que define una salida del nivel debido a la actividad de tala. Al momento de llegar los árboles al nivel “árboles jóvenes”, un porcentaje de éstos son talados. La fórmula correspondiente es:

$$Tala Joven = Plantín a Joven * \%tala joven$$

- Joven a Adulto: Flujo de salida con comportamiento similar al de “Plantín a Joven” con la diferencia de que cuenta con un tiempo de espera diferente (5 años), y se encuentra influido por la otra salida existente en el nivel.

$$Plantín a Joven = DELAY FIXED((Plantín a Joven * (1 - \%tala joven)), tiempo de crecimiento 2,0)$$

- **ÁRBOLES ADULTOS:** última variable de nivel en el proceso de desarrollo de los árboles. Este nivel presenta un flujo de entrada correspondiente al flujo de salida de la variable anterior “Joven a Adulto” y una variable de salida correspondiente a la actividad de tala de las plantas.

$$\frac{dÁRBOLES ADULTOS}{dt} = Joven a Adulto - Tala Adulta$$

$$ÁRBOLES ADULTOS(T = 0) = 0$$

- Joven a Adulto: Flujo de entrada definido por el flujo de salida de la variable de nivel anterior.
- Tala Adulta: esta variable de flujo representa la única salida de esta variable de nivel. Posterior a la llegada de los árboles al nivel, éstos se someterán a un tiempo de asentamiento previo a la tala de los mismos.

Este proceso es total, por lo que no se mantienen remanentes de árboles después de la última espera.

Tala Adulta

= *DELAY FIXED (Joven a Adulto, tiempo de espera para tala adulta, 0)*

- **COSTOS:** Este nivel se compone de la acumulación de todos los gastos presentes en el desarrollo de la simulación. Los flujos de entrada pertenecientes a esta variable son los costos de preparación inicial del terreno, costos de mantenimiento y costos correspondientes a la actividad de tala. Ya que se considera este nivel sólo de forma acumulativa, no posee flujos de salida.

$$\frac{dCOSTOS}{dt} = \text{Costos Preparación Inicial} + \text{Costos de Mantenimiento} + \text{Costos Anuales}$$

$$COSTOS(T = 0) = 0$$

- **Costos Preparación Inicial:** Este flujo de costos se compone por todas las variables intervinientes en la actividad de plantación, ya sea la preparación del terreno o la utilización de robots y mano de obra para el establecimiento de los árboles. Este costo se genera de forma inmediata al momento de ejecutarse la plantación.

$$\text{Costos Preparación Inicial} = \text{Costo alquiler} + \text{costo compra árboles} + \text{costo deshierbe} + \text{sueldo} + \text{costo preparación}$$

- **Costos Mantenimiento:** Los gastos de mantenimiento se presentaron como un flujo pulsante de manera anual, estos costos se componen de costos de fertilización y control de plagas, los cuales varían según las unidades de árboles existentes en todo el sistema y conforman los costos totales de mantenimiento anual.

$$\text{Costos Mantenimiento} = \text{PULSE TRAIN}(0,0,11,360) * \text{costos de mantenimiento}$$

- Costos Anuales: esta variable de flujo representa los costos por tala presentes en el desarrollo de la actividad y está compuesto por los costos de tala joven y adulta.

$$\text{Costos Tala} = \text{costos tala adulta} * \text{Tala Adulta} + \text{costos tala joven} * \text{Tala Joven}$$

- INGRESOS: En el modelo descrito, los ingresos generados y acumulados en esta variable de nivel son generados únicamente por las actividades de tala y, al igual que los costos, sólo es de carácter acumulativo sin presencia de flujos de salida.

$$\frac{d\text{INGRESOS}}{dt} = \text{Ingresos Tala}$$

$$\text{INGRESOS}(T = 0) = 0$$

- Ingresos Tala: esta es la única variable de flujo correspondiente al nivel ingresos. Se compone de la venta de la madera obtenida por las actividades de tala. El precio en el mercado se encuentra definido acorde al peso de la madera, por lo que fue necesario definir los volúmenes y densidades de los arboles jóvenes y adultos.

$$\begin{aligned} & \text{Ingresos Tala} \\ = & (\text{Tala Joven} * \text{volumen árbol joven} + \text{Tala Adulta} * \text{volumen árbol adulto}) \\ & * \text{densidad madera} * \text{precio por tonelada} \end{aligned}$$

2.6 Simulación

Se definieron 3 escenarios hipotéticos para la simulación para poder de esta forma evaluar el impacto de las variables modificables en el desarrollo de la actividad. Las situaciones definidas son la plantación implementando un operario y ningún robot, un robot y ningún operario y por último la implementación de un robot y un operario. El horizonte temporal para el desarrollo de la simulación será de 30 años o 360 meses.

2.6.1 1 Operario y 0 Robots

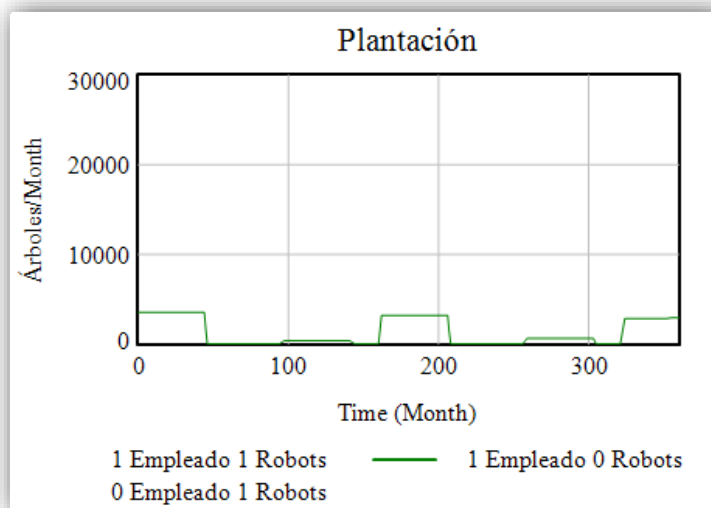


Ilustración 11. Plantación con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia

Uno de los principales egresos del modelo se presenta en forma de salario de operario o alquiler de los robots. Al presentarse una menor capacidad de plantación, los egresos se prolongarán en el tiempo generando un gasto mayor.

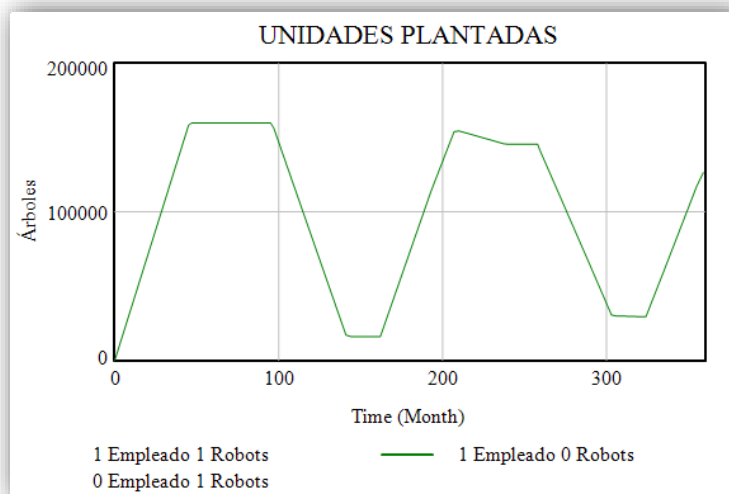


Ilustración 12. Unidades plantadas con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia

La baja capacidad de plantación provoca una pendiente de crecimientos de árboles plantados más leve, lo que ralentizará el paso de unidades a la siguiente etapa.

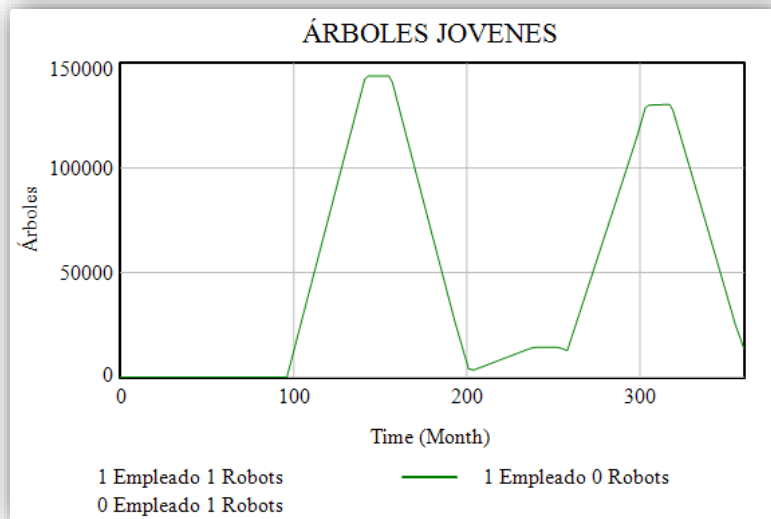


Ilustración 13. Árboles jóvenes con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia

La variable árboles jóvenes es resultante de una espera o retardo partiendo de unidades plantadas, por lo que un lento crecimiento en la anterior generará un mayor retardo para alcanzar los niveles deseados. Por otro lado, de esta variable se deriva la primera fuente de ingresos, la cual fue nombrada como tala joven. Todo retraso generado resultará en una tardía obtención de ingresos.

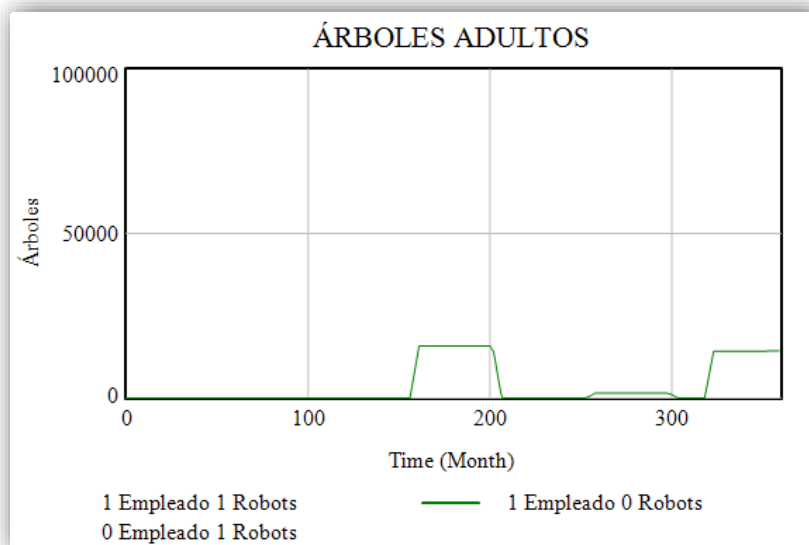
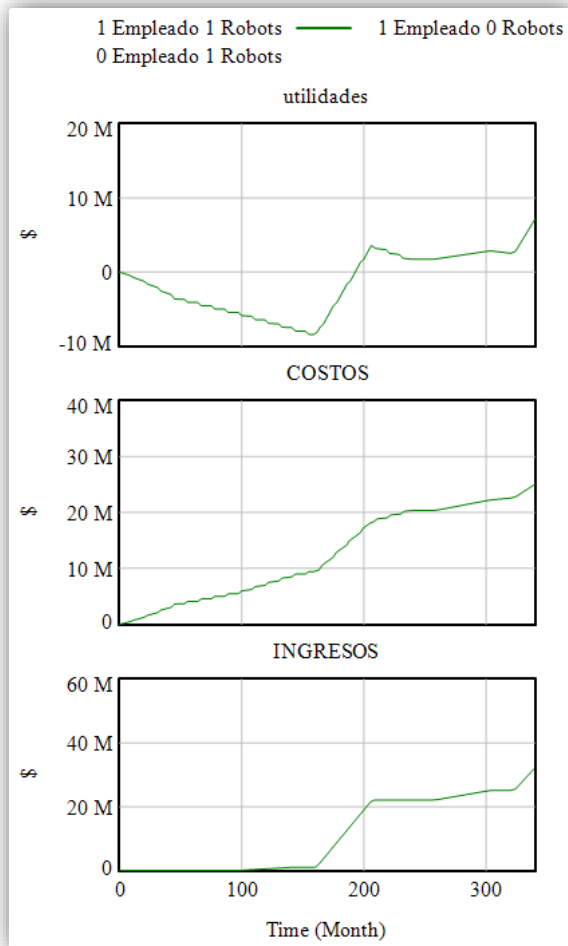


Ilustración 14. Árboles adultos con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia

Al igual que con la variable anterior, el comportamiento de ésta se ve afectado por los retardos presentados y se derivan ingresos por la tala de árboles adultos, presentando un retardo más, el cual se establece para asegurar el desarrollo completo de los especímenes.



En este escenario, como se puede apreciar, se alcanza un costo total acumulado de aproximadamente 25 millones de pesos en el tiempo de simulación. Por otro lado se llega a un ingreso cercano a 34 millones de pesos. Si analizamos las utilidades observamos un desembolso o inversión inicial requerida antes de la obtención de utilidades positivas. De esta forma observamos que este modelo es rentable en el tiempo, obteniendo un resultado cercano a los 8 millones de pesos argentinos en el tiempo de simulación definido.

Ilustración 15. Utilidades, costos e ingresos con 1 operario y 0 robots. Fuente: Elaboración propia

2.6.2 1 Robot y 0 Operarios

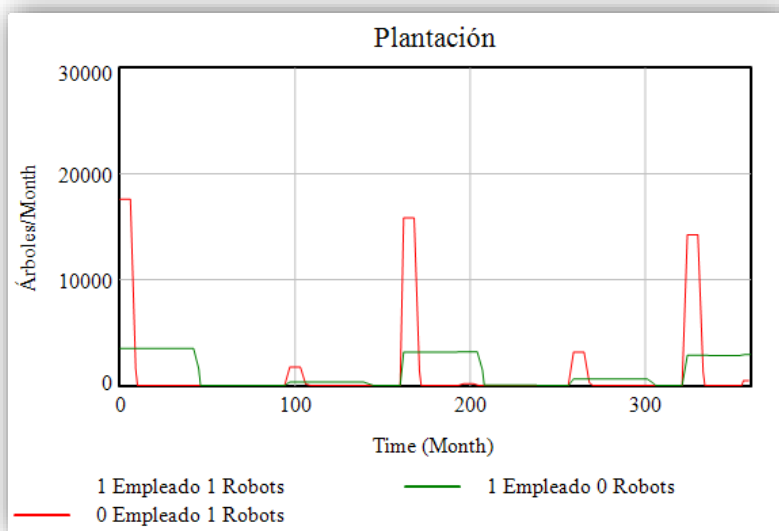


Ilustración 16. Plantación con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia

A simple vista se aprecia una variación más marcada en el flujo de plantación en un período más acotado de tiempo en comparación con el flujo presentado con cero robots y un empleado.

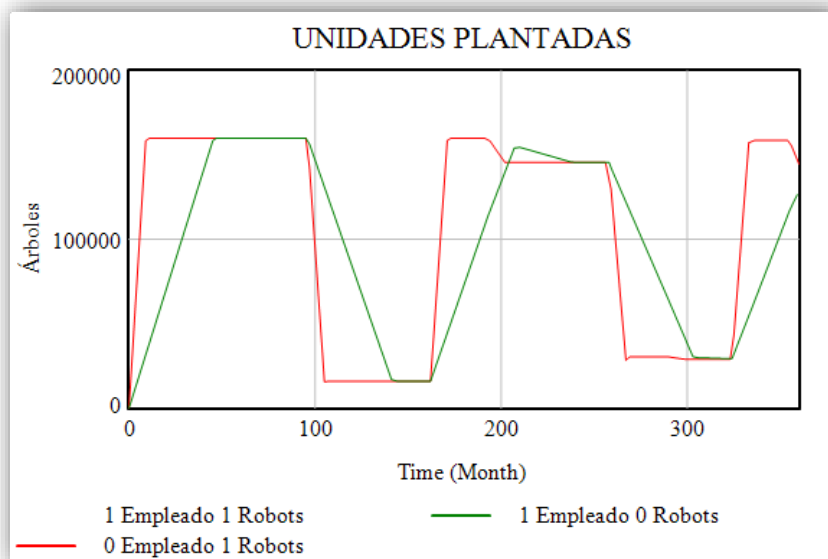


Ilustración 17. Unidades plantadas con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la totalidad de plantas se encuentran posicionadas en un tiempo mucho menor que implementando un solo operario. De esta forma el paso a la etapa siguiente se presenta más temprano en el tiempo.

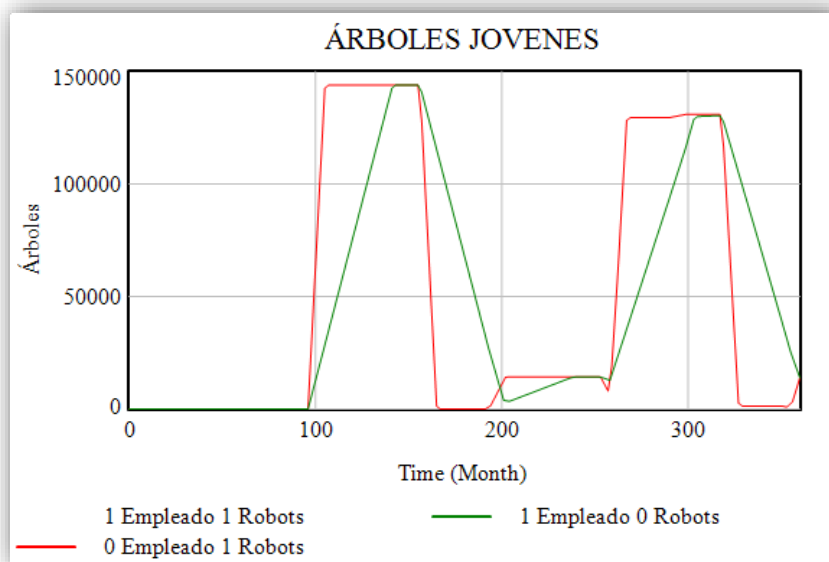


Ilustración 18. Árboles jóvenes con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia

En esta variable se observa que una gran cantidad de árboles jóvenes se presenta con anterioridad a las observadas en el caso de un empleado y ningún robot. Por estos motivos se presenta un flujo de ingresos más tempranos.

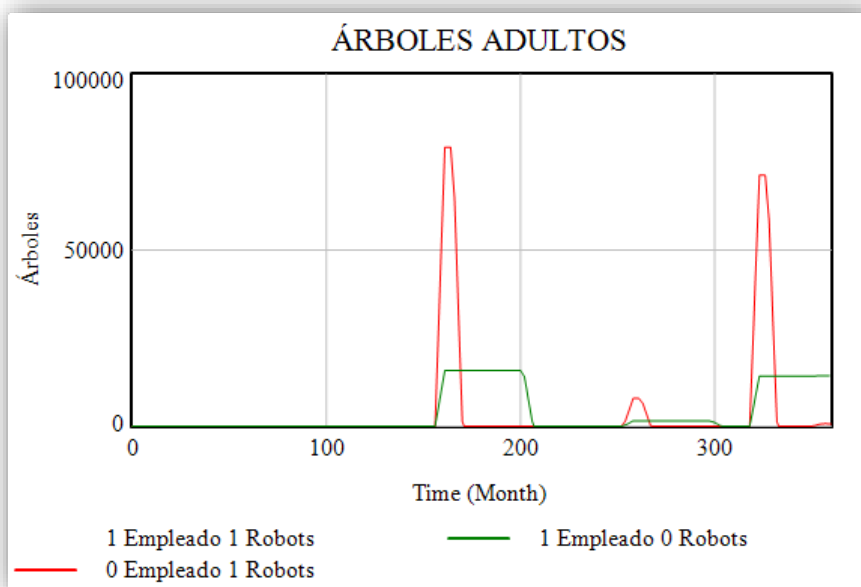
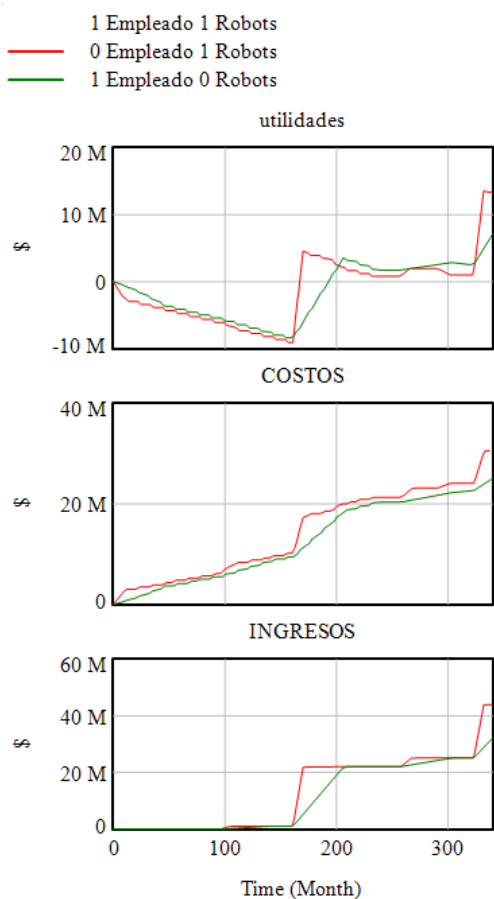


Ilustración 19. Árboles adultos con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia

En esta variable se observa una notable diferencia entre los casos presentados, ya que el segundo escenario demuestra flujos mayores, los árboles adultos en existencia crecerán rápidamente. La repentina existencia de árboles adultos resultará en una tala y flujo de ingresos más tempranos.



Comparando los resultados obtenidos en el horizonte temporal definido, puede observarse que pese a presentarse costos mayores por la implementación del robot, las utilidades resultantes son más favorables en este escenario, rondando los 13 millones de pesos argentinos en el mismo periodo de tiempo de simulación.

Ilustración 20. Utilidades, costos e ingresos con 1 robot y 0 operarios. Fuente: Elaboración propia

2.6.3 1 Robot y 1 Operario

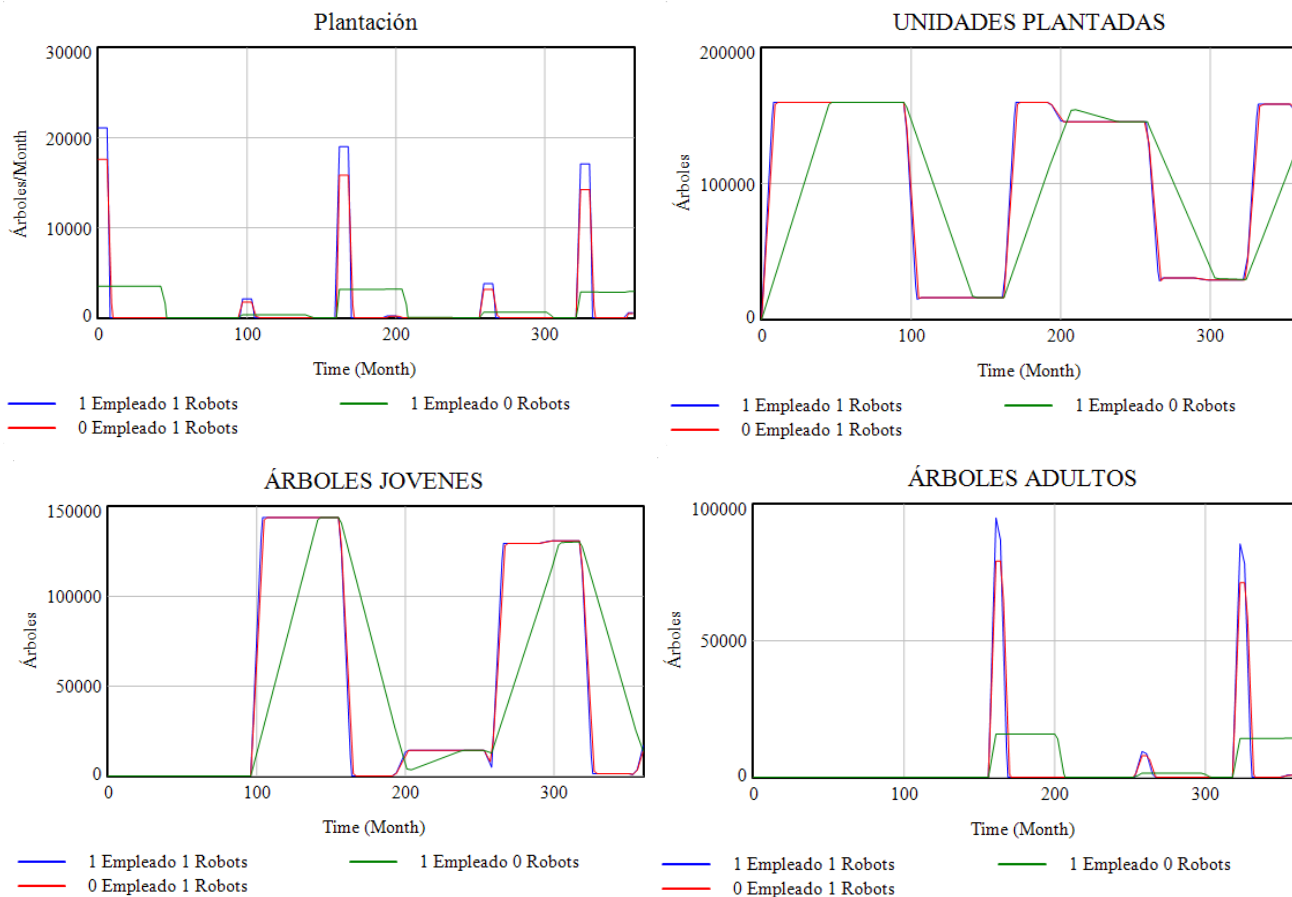


Ilustración 21. Plantación, unidades plantadas, árboles jóvenes y árboles adultos con 1 robot y 1 operario. Fuente: Elaboración propia

En la aplicación de este escenario puede obtenerse un resultado similar al del robot por sí solo, con un efecto más marcado en cada una de las etapas descritas en el caso anterior. Los niveles máximos son alcanzados con mayor rapidez y por lo tanto más tempranos serán los ingresos.

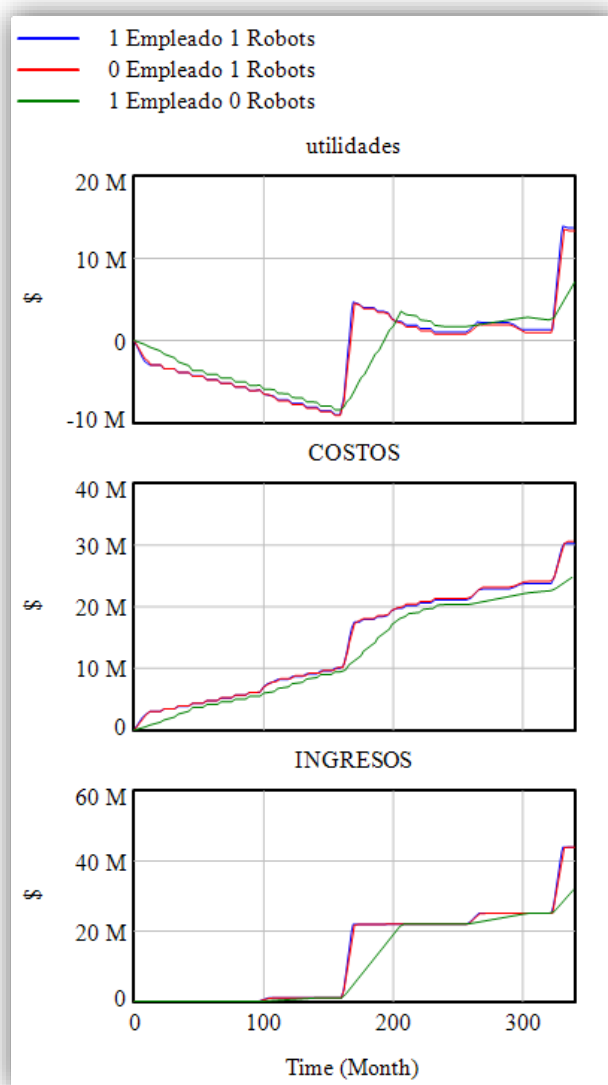


Ilustración 22. Utilidades, costos e ingresos con 1 robot y 1 operario. Fuente: Elaboración propia

En el diagrama causal anterior se aprecia una pequeña mejora en ingresos y utilidades y un pequeño aumento en los costos.

CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos por medio de la simulación en el horizonte temporal definido para el modelo, el método de trabajo más beneficioso para el desarrollo de esta actividad sería aplicando un robot y un operario. Esta metodología permitiría la obtención de utilidades de alrededor de los \$15 millones con un desembolso de dinero inicial similar a los otros casos.

Cabe destacar que estos resultados fueron obtenidos en base a los supuestos y consideraciones detallados en el trabajo, lo que simplificó y redujo el campo de estudio y que, para un análisis más complejo, se debería considerar la actividad forestal en su totalidad.

Además, de acuerdo a estos resultados, se puede concluir que la fuerza de trabajo humana aún es importante en el campo de la forestación y que si bien la tecnología ha avanzado mucho últimamente, ambas fuerzas pueden trabajar en conjunto, sin la necesidad de reemplazar la mano de obra de forma completa.

Con todo esto presentado se puede concluir que la aplicación de estas tecnologías aplicadas a la actividad presentaría resultados positivos en el ejercicio.

BIBLIOGRAFÍA

- Dólar estadounidense a peso mexicano.* (s.f.). Obtenido de <https://es.investing.com/currencies/usd-mxn-historical-data>
- Ing. Bukovits, A. A., & Ing. Nuñez Romagnoli, S. D. (Octubre de 2017). *Diseño y Desarrollo de Robot Forestador.*
- Ing. Romera, N. (2018). *Dinámica de Sistemas. Introducción Dinámica de Sistemas.*
- INTI - CITEMA . (Agosto de 2003). *Densidad de maderas ordenadas por nombre común.* Obtenido de https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf
- México, C. N. (2011). *Evaluación de Costos de Establecimiento y Mantenimiento de Plantaciones Forestales Comerciales.* Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/5/4137Evaluaci%C3%B3n%20de%20costos%20de%20establecimiento%20y%20mantenimiento.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. (Julio de 2018). *Boletín de precios de productos y servicios forestales.* Obtenido de <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxwcmVjaW9zM9yZXN0YWxlc2lwMTV8Z3g6NmMxOTExOThmMmYxYTM4NQ>
- Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. (s.f.). *Crecimiento de Plantaciones de Pinus elliottii, Pinus taeda y Pinus elliottii var elliottii x Pinus caribaea var hondurensis de 13 años de edad bajo diferentes modalidades de control de malezas.* Obtenido de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/13662/mod_resource/content/1/Clase_2_Factores_de_produccion/Pezutti%20y%20Caldato%20ensayo%20malezas%20Pinus%2013%20a%C3%B1os.pdf