UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

VALPARAÍSO – CHILE

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UN ESTUDIO DE PROSPECTIVA UTILIZANDO ARQUETIPOS Y DINÁMICA DE SISTEMAS. CASO APLICADO: MINERA CODELCO

PATRICIO GABRIEL VERA SOTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA:

CHRISTOPHER NIKULIN

PROFESOR CORREFERENTE:

MÓNICA LÓPEZ

Junio – 2017

Agradecimientos

Agradezco a todo el mundo que me otorgo su apoyo en este largo periodo, en especial a mi familia que me acompaño no solo en un proceso de titulación sino de conocimiento y crecimiento personal, que no estuvo ajeno a los problemas, pero gracias a ellos todo pudo resultar como se esperaba.

Resumen

Los métodos prospectivos son aquellas herramientas que permiten reducir la incertidumbre del futuro, es por esta razón que son utilizadas en casi todos los campos de investigación. En este artículo se propone una metodología que combina 2 métodos: el sistema de arquetipos, que corresponde a estructuras genéricas que permiten enfrentar y modelar problemas de gestión y la dinámica de sistemas, que ofrece un soporte técnico a nivel computacional para poder evaluar diferentes escenarios, políticas o soluciones a problemas. Esta combinación permite agilizar el proceso de representación de situaciones problemáticas ya que se utilizan como arquetipos modelos y experiencias previas de otros autores, donde ya se habían validado las relaciones. Además, se corrobora que las propiedades de los arquetipos concuerdan con los requerimientos de la modelación deseada. La aplicación de esta metodología de prospectiva se hace específicamente creando un modelo que representa la minería chilena del cobre y que ofrece soporte a los procesos de toma de decisiones. Así se propone un modelo que considera los problemas mineros más básicos y que en unión con el sistema de arquetipos favorece el análisis de muchas otras situaciones. En particular, se presenta el análisis realizado en la empresa minera chilena estatal Codelco, sobre cómo actúa la producción y la inversión en la industria del cobre según la gobernabilidad y el estado del mercado del cobre, incluyendo en el modelo dichos comportamientos. Finalmente, se concluye con éxito la creación de un modelo y los análisis de los escenarios planteados, que establecen de manera clara y útil las propiedades de los arquetipos sistémicos.

Abstract

This article proposes a combination of forecasting methods which allow to obtain a more holistic understanding about companies' future, the article proposal combines 2 well known methods: (i) archetypes system, which corresponds to generic structures that allow to face and model management issues and (ii) system dynamics, which offers technical support at a computational level in order to assess different scenarios, politics or problem solutions. This combination enables to streamline the process of representing problematic situations to be forecast. The application this integrated proposal was validated by creating a model that represents Chilean copper mining company. Therefore is proposed a model that considers the most basic mining problems and that in joint with the archetype system promotes the analysis of several situations. In particular, it is presented the analysis performed in the Chilean mining company CODELCO about how the production and investments work in the copper industry according to governance and the state of the copper market, including in the model those behaviours. Finally, it is successfully concluded the creation of a model and the analysis of the proposed scenarios, which state clearly and usefully the properties of systemic archetypes.

Índice

1 Introducción 1
2 Objetivos 2
2.1 Objetivos Generales 2
2.2 Objetivos Específicos 2
3 Estado del Arte 3
3.1 Dinámica de Sistemas y Análisis de escenarios. 3
3.2 El entendimiento de los arquetipos sistémicos para su uso en la creación de modelos causales 3
4 Metodología 5
4.1 Paso 1: Estudio de la situación y clasificación de la información. 6
4.2 Paso 2: Priorización de Variables para la Modelación Base. 6
4.3 Paso 3: Creación del modelo causal. 6
4.4 Paso 4: Creación del modelo con dinámica de sistemas. 7
4.5 Paso 5: Validación del Modelo 7
4.5.1 Análisis de validación estructural. 7
4.5.2 Análisis de validación de comportamiento. 8
4.6 Paso 6: Creación de escenarios y análisis. 8
5 Caso de Estudio: Codelco. 9
5.1 Paso 1: Estudio de la situación actual y la clasificación de la información. 9
5.1.1 Contexto de la situación actual en la minería chilena. 9
5.1.2 Clasificación de la Información. 10
5.2 Paso 2: Priorización de Variables para la creación del modelo base. 10
5.3 Paso 3: Creación del modelo causal. 12
5.4 Paso 4: Creación del modelo con dinámica de sistemas. 15
5.5 Paso 5: Validación del Modelo. 15
5.6 Paso 6: Creación de escenarios y análisis de resultados. 17
6 Resultados 19
7 Conclusiones 21
8 Referencias 22
9 Anexo A: Variables del Modelo 24
10 Anexo B: Modelo con Dinámica de Sistemas 26
11 Anexo C: Software Vensim 27
12 Anexo D: Resultados 29

13 Anexo E: Dinámica de Sistemas 33
14 Anexo F: Arquetipos sistémicos.....37

Índice de Tablas

Tabla 5.1: Criterios de Relación.....10
Tabla 5.2: Matriz de Vester.....10
Tabla 5.3: Valores correspondientes a cada escenario.....18
Tabla 6.1: Resultados de los escenarios (Utilidades y Proyectos Realizados).....20
Tabla 9.1: Variables, tipos, descripciones y ecuaciones del modelo.....24

Índice de Figuras

Figura 4.1: Metodología por pasos. 5
Figura 5.1: Tipos de Problemas. 11
Figura 5.2: Modelo base, resultado de la Matriz de Vester. 12
Figura 5.3: Proceso de Viabilidad de Recursos y Reservas: Completo y Reducido. 13
Figura 5.4: Modelo Causal. 14
Figura 5.5: Comparativa entre Ingresos Reales vs Ingresos del Modelo. 16
Figura 5.6: Comparativa entre Utilidades Reales y Utilidades del Modelo. 16
Figura 5.7: Escenarios Modelados. 18
Figura 10.1: Modelo con dinámica de sistemas. 26
Figura 11.1: Interfaz gráfica software Vensim. 27
Figura 11.2: Tipos de Variables. 27
Figura 11.3: Interfaz de edición de variables. 28
Figura 12.1: Costos Totales. 29
Figura 12.2: Ingresos. 30
Figura 12.3: Utilidades. 30
Figura 12.4: Producción. 31
Figura 12.5: Recursos. 31
Figura 12.6: Reservas. 32
Figura 12.7: Producción. 32
Figura 13.1: Diagrama Causal de la población versus la comida por persona. 33
Figura 13.2: Bucle de realimentación negativa. 34
Figura 13.3: Bucle de realimentación positiva. 35
Figura 14.1: Arquetipo Límites de crecimiento. 37
Figura 14.2: Arquetipo Desplazamiento de la carga. 37
Figura 14.3: Arquetipo Erosión de metas. 38
Figura 14.4: Arquetipo Éxito para quien tiene éxito. 38
Figura 14.5: Arquetipo Tragedia del terreno común. 39
Figura 14.6: Arquetipo Escalada. 39

Índice de Ecuaciones

Ecuación 13.1: Ecuación de Nivel. 35
Ecuación 13.2: Ecuación de Flujo. 36

1 INTRODUCCIÓN

Las organizaciones para ser competentes deben ser capaces de prepararse y tomar las mejores decisiones y así de esta forma poder enfrentar los múltiples futuros de la forma más competente posible (Godet, 2007). Para esta tarea los análisis prospectivos se transforman en herramientas muy valiosas, las cuales pueden ser utilizadas en diferentes campos de investigación (Chung Pinzás, 2009). Esto ha provocado que los métodos prospectivos reciban atención dado los rápidos cambios que está sufriendo el mundo en diversos aspectos y en múltiples variables. Por lo tanto, las personas encargadas de tomar las decisiones deben escoger aquellos métodos que les permitan estar constantemente actualizando la información relacionada con los posibles futuros y que soporten una gran cantidad de datos (Christensen, 2013)

Para poder estudiar diferentes escenarios complejos del futuro se suelen seguir tres fases, una fase de entendimiento del presente, en la cual se deben identificar el mayor número de variables que inciden en el comportamiento de una organización, una fase de entendimiento del futuro, en la que se deben identificar aquellas variables pasadas o emergentes que tendrán influencias en el porvenir además de todas las relaciones existentes entre ellas, y finalmente se deben crear los escenarios a partir de diferentes hipótesis sobre el futuro (Bustamante, 2006). Conseguir este proceso de análisis requiere de bastante conocimiento y participación activa de expertos que busquen las relaciones que existe entre las variables (Flores, 2013).

Para lograr lo anterior, existen limitaciones que se deben enfrentar en los análisis prospectivos, como son la necesidad de eficacia al modelar y la posibilidad de actualizar la información contenida en los modelos, así como una correcta adecuación a diferentes escenarios que se presentan del futuro y de los cuales no necesariamente se tiene control (Flores, 2013), y además reducir los efectos de la inexperiencia en los casos de modelación (Godet, 2007).

Dadas las mencionadas limitaciones que presentan los métodos prospectivos tradicionales, se propone utilizar el sistema de arquetipo, que consiste en un método rápido en el que se pueden utilizar representaciones de situaciones problemáticas pre establecidas con el objetivo de diseñar modelos para enfrentar el futuro (Senge, 1990). Esto permite armar un modelo causal en base a situaciones previamente modeladas o basados en arquetipos genéricos ya estudiados por otros autores (Wolstenholme, Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics, 2003).La herramienta anterior permite dar forma al modelo que representará la situación del problema. Dado que además es necesario utilizar alguna estrategia para cuantificar el modelo, se propone el uso de la dinámica de sistemas. Esta técnica utiliza como base los modelos causales para generar un nuevo modelo en un lenguaje que permite evaluar sus variables y poder realizar los análisis del entorno complejo (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005)

Por tanto, el presente artículo propone una metodología de integración de los arquetipos sistémicos con la dinámica de sistemas. La aplicación de esta metodología muestra con claridad las propiedades de los arquetipos sistémicos y su aplicación, además del uso de experiencias previas de otros autores o arquetipos genéricos para la creación de un modelo en el cual se puedan analizar diferentes escenarios, soluciones o políticas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Diseñar un método de modelación de un entorno complejo que cumpla con las características exigidas por la dinámica de sistemas y los arquetipos sistémicos, que permita analizar diferentes situaciones de interés, que faciliten la toma de decisiones y crear un modelo que represente de forma básica el sistema minero que pueda ser fácilmente replicable, utilizable y modificable.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar un enfoque de dinámica de sistemas para modelar un entorno complejo.
- Utilizar arquetipos sistémicos como herramientas que faciliten la creación de modelos causales.
- Diseñar una metodología de modelación.
- Reconocer aquellos parámetros más relevantes para el problema base.
- Obtener estructuras de funcionamiento a partir de información de tipo cualitativo y cuantitativo.
- Proponer avances en el uso de arquetipos sistémicos.
- Crear un modelo representativo y funcional de la actividad minera a partir de la dinámica de sistemas.
- Implementar un caso de estudio de manera satisfactoria con el modelo creado.
- Analizar los resultados e identificar aquellas políticas que poseen mayor influencia importancia en el caso de estudio.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 DINÁMICA DE SISTEMAS Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS.

La dinámica de sistemas es una técnica que se utiliza para analizar el comportamiento de los sistemas en el tiempo. Su aplicación se extiende por campos administrativos, medioambientales, políticos, económicos, médicos e ingeniería, entre otros. (Forrester, 1998). La dinámica de sistemas es una herramienta que permite construir modelos de simulación en un ordenador, basados en la comprensión de las relaciones causales y la retroalimentación de los elementos del sistema para la toma de decisiones en entornos complejos (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005). Este tipo de modelos permiten hacer evaluaciones haciendo uso de diferentes tipos de enfoques como, por ejemplo, regresiones lineales, análisis multivariados (Brandmaier, von Oertzen, McArdle, & Lindenberger, 2013), modelos estocásticos y probabilísticos (Canavos & Medal, 1987). Aunque la dinámica de sistema permite mezclar distintos enfoques no se priorizan estos, sino que se prioriza el escenario antes que considerar todas las variables y la relación directa entre las variables, es decir que el escenario elegido es el conducto principal para escoger las variables (Jablonka, 2007).

3.2 EL ENTENDIMIENTO DE LOS ARQUETIPOS SISTÉMICOS PARA SU USO EN LA CREACIÓN DE MODELOS CAUSALES.

Los arquetipos sistémicos corresponden a representaciones de situaciones problemáticas organizacionales que se repiten en muchos contextos y que son analizados desde el punto de vista de la dinámica de sistemas (Senge, 1990). Cada arquetipo es representado mediante un diagrama de ciclos causales que muestran la estructura provocada por la situación problemática asociada al arquetipo. También con frecuencia se presentan gráficos que muestran las tendencias de comportamiento de alguna de las variables de los arquetipos y principios de gestión que facilitan la creación de políticas o acciones que permiten enfrentar el problema (Senge, 1990). A pesar de que los arquetipos se definen como estructuras rígidas, estás siguen siendo modelos dinámicos por lo que soportan cambios y modificaciones a su estructura (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005) que se podrán adaptar a diferentes casos.

Para entender los arquetipos es fundamental conocer los elementos que los componen. Además del **elemento estructural** se definen otros dos, uno **funcional** que se otorga según el contexto en el cual se esté trabajando, es decir dos arquetipos con estructuras idénticas difieren dependiendo de la utilidad que se les deseé dar (Mejía & Díaz, 2006) y el **elemento comportamental** que hace referencia a los tipos de ciclo que se asignan a las estructuras, según si se busca un crecimiento o decrecimiento de una variable cualquiera (Mejía & Díaz, 2006). A raíz de esta forma de entender los arquetipos se puede comprender el trabajo de Wolstenholme (2003), quien propone que se pueden modelar muchas situaciones problemáticas a partir de un arquetipo compuesto por dos bucles causales, incluyendo ciertos cambios a los mismos para que cumplan con una función y un comportamiento. De esta forma se pueden comprender los arquetipos como estructuras predefinidas, que aceptan muchas modificaciones mejorando su utilidad y en algunos casos entregando mayor simplicidad. El siguiente aspecto a considerar para entender los arquetipos, corresponde a cómo se enfrenta la modelación de una situación problemática. Siempre se debe abarcar en primera medida la modelación del problema y solo después se deben incluir las soluciones, ya que éstas corresponderán a una modificación del

arquetipo relacionado (Wolstenholme, Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics, 2003) (Mejía & Díaz, 2006). Además, el proceso de modelación utilizando este sistema no se encuentra limitado a un arquetipo por problema, muchas veces es necesario **integrar** muchas estructuras lo que generalmente ocurre cuando existen variables en común, un ejemplo de esto es el modelo creado para la expansión de un hospital presentado por Wolstenholme (2004) y el modelo creado por Kim & Burchill (1992) para la organización de empresas. En definitiva, el entendimiento actual de los arquetipos favorece su utilidad y la simplicidad de los mismos para la creación de modelos más complejos.

4 METODOLOGÍA

En la Figura 4.1 se presenta el método utilizado para crear el modelo y los escenarios posteriormente analizados:

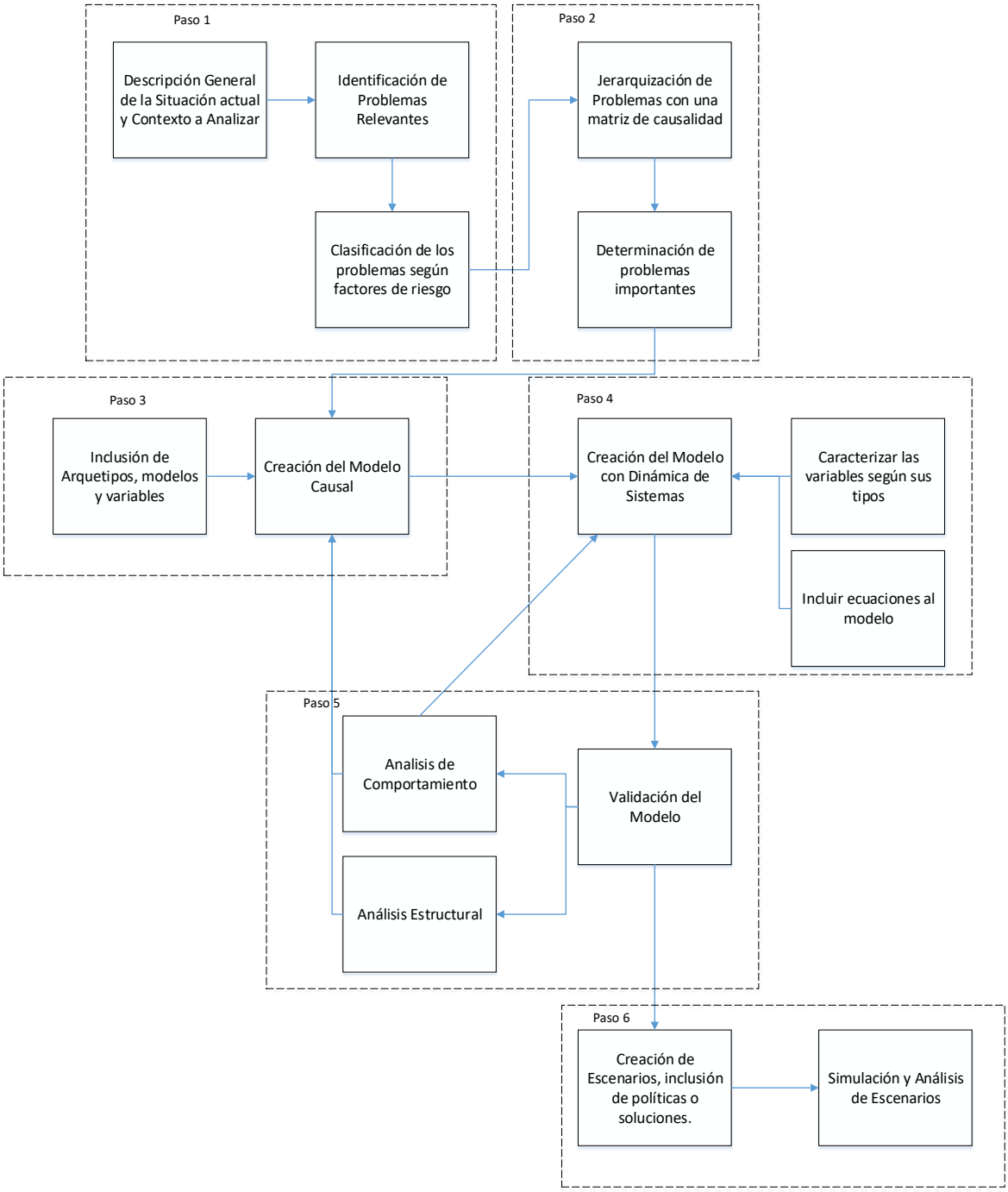


Figura 4.1: Metodología por pasos.

4.1 PASO 1: ESTUDIO DE LA SITUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN.

El primer paso consiste en el estudio de la situación a analizar y la posterior clasificación de la información obtenida con el fin de poder identificar los posibles problemas para crear el modelo. Para cumplir con este propósito se debe realizar una amplia investigación del tema, para posteriormente clasificar los datos de manera sintetizada en diferentes factores de riesgo (David, 2003): económicos- financieros, socio-culturales, tecnológicos, ambientales y productivos, con el fin de que abarquen de forma general y amplia aquellas situaciones donde se pueden generar problemas en una organización.

4.2 PASO 2: PRIORIZACIÓN DE VARIABLES PARA LA MODELACIÓN BASE.

La clasificación de información del paso 1 puede generar una gran cantidad de variables para la modelación, por lo que el proceso se puede tornar arduo e incluso se puede perder el propósito de éste debido a que no toda la información podría ser necesaria para un análisis, lo que hace fundamental dar prioridad a aquellos problemas o variables que influyan de mejor manera en la o las situaciones problemáticas, asociadas al caso de estudio.

Para realizar la priorización de variables se propone utilizar la Matriz de Vester, como se hizo en el trabajo de Cole (2006) donde se utiliza una matriz de relaciones como herramienta para dar prioridad a las variables del paso 1 y además identificar las formas del modelo. Este método permite identificar aquellos problemas o variables que son causa de otros, aquellos que son causa y a la vez consecuencia de la mayoría o problemas centrales, y finalmente los que son consecuencia de los centrales. En este artículo se utilizan los problemas centrales porque aseguran la creación de un modelo base que podrá ser utilizado en la mayoría de las situaciones de interés, ya que está vinculado a todos los problemas y por lo tanto también a políticas y soluciones posibles.

Finalmente se debe destacar que las variables obtenidas en este paso deben permitir crear un modelo que contenga las suficientes variables significativas para enfrentar diferentes situaciones.

4.3 PASO 3: CREACIÓN DEL MODELO CAUSAL.

En este paso se creará el modelo causal con los problemas escogidos en el paso 2, lo importante es integrarlos en un solo modelo. Para conseguir esto se debe hacer uso de arquetipos sistémicos, modelos o experiencias previas de otros autores y variables según fuese necesario para completarlo.

Para continuar con la creación del modelo se siguen las siguientes etapas:

- Etapa 1: Se describen todos los arquetipos sistémicos, modelos de otros autores o variables que representen a los problemas, no tiene mucha importancia que estos sean de carácter cualitativo o cuantitativo siempre que exista algún método para evaluarlos numéricamente. Además, se deben establecer las relaciones entre ellos. Lo más importante es poseer información que avale esta relación, pudiendo ser estudios científicos, técnicos o experiencias.

- Etapa 2: En esta etapa se deben identificar las variables que influyen directamente en los elementos incorporados en la etapa 1, los cuales permitirán completar el modelo o crear conexiones entre arquetipos y variables.

- Etapa 3: se siguen repitiendo las etapas anteriores sin existir un límite. Este generalmente se obtiene cuando se llega a elementos exógenos al sistema que están determinados directamente por el analista o no dependen de ninguna variable del mismo sistema.

4.4 PASO 4: CREACIÓN DEL MODELO CON DINÁMICA DE SISTEMAS.

En este paso se crea el modelo con dinámica de sistemas (Anexo E), lo que consiste en integrar el modelo resultado del paso 3 con los conceptos de dinámica de sistemas. Se propone que en esta etapa se utilice un software que permita el salto entre un modelo causal y uno dinámico (Anexo C). Se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Etapa 1: En esta etapa es necesario caracterizar las variables según el tipo al que pertenecen ya sean variables de nivel, de flujo o auxiliares.

- Etapa 2: Se deben concretar las relaciones matemáticas existentes entre las variables. El software entrega muchas herramientas para esto como funciones matemáticas, inclusión de gráficos, tablas y ecuaciones.

- Etapa 3: En esta etapa se asignan aquellos valores que son constante en el horizonte de simulación. No siempre se conocen todos los parámetros, en casos en que no se posea esta información, se pueden asignar valores razonables.

4.5 PASO 5: VALIDACIÓN DEL MODELO

En este paso se debe evaluar la estructura, validez y calidad del modelo con el propósito de que sea capaz de representar la problemática definida. Los posibles análisis a realizar son diversos y comprenden desde la revisión lógica de los diagramas causales hasta una revisión y comparación de resultados. Con este propósito se utilizan dos análisis: el análisis de validación estructural y el análisis de validación del comportamiento (Santa Catalina, 2010).

4.5.1 Análisis de validación estructural.

En la primera validación se consideran los siguientes aspectos: primero se debe establecer si las relaciones expuestas tienen coherencia y explican la realidad de lo que se quiere evaluar, muchas veces estas relaciones se pueden demostrar con estudios científicos, técnicos o que hagan referencia a expertos en el tema.

También es necesario evaluar que las ecuaciones del sistema sean técnicamente correctas, es decir que estas deben ser dimensionalmente consistentes y que las variables y parámetros estén claramente especificados. Si el modelo no supera esta prueba será declarado inválido y por lo tanto inútil, ya que no existe confianza en los resultados (Godoy & Bartó, 2002).

Si este análisis no es superado se debe reevaluar el modelo desde el paso 3 para hacer un re-análisis del modelo causal.

4.5.2 Análisis de validación de comportamiento.

El análisis de validación del comportamiento permite analizar la validez de la estructura de manera indirecta al probar el comportamiento del modelo frente a diferentes situaciones, por ejemplo, asignar valores extremos a distintos parámetros, y contrastar la salida de datos del modelo con el comportamiento esperado o datos reales, haciendo hincapié en la forma en que salen los datos y no tanto en el valor entregado por el modelo (Godoy & Bartó, 2002).

En esta fase se busca calibrar los parámetros y obtener resultados realistas correspondiente al paso 4. En caso de no conseguir calibrar el modelo es necesario repetir los procesos de creación del modelo desde paso 3.

4.6 PASO 6: CREACIÓN DE ESCENARIOS Y ANÁLISIS.

El último paso corresponde a la creación de escenarios y el análisis de éstos. El objetivo es manejar la incertidumbre del futuro, identificar o anticipar cambios, reducir riesgos futuros y además encontrar estrategias efectivas para la resolución de problemas.

Para la creación de escenarios se deben establecer los comportamientos de algunas de las variables del modelo en un periodo de tiempo determinado y observar los resultados que entrega el modelo para la creación de estrategias o políticas. También es posible incluir soluciones a problemas concretos ya sea en forma de ciclos causales o nuevas variables acordes al uso de arquetipos y luego observar los resultados que entrega el modelo. Además, se recomienda crear por lo menos dos escenarios que se contrasten para poder manejar la incertidumbre, éstos deben ser plausibles especialmente para no tomar decisiones alejadas de la realidad, y deben ser internamente consistentes, relevantes para el caso de estudio e idealmente proponer perspectivas interesantes.

Finalmente, después de obtener los resultados de las simulaciones con los escenarios descritos, el analista deberá hacer las evaluaciones de la manera más objetiva posible y concordante con su propósito (Vergara Schmalbach, Fontalvo Herrera, & Maza Ávila, 2010).

5 CASO DE ESTUDIO: CODELCO.

5.1 PASO 1: ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y LA CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN.

5.1.1 Contexto de la situación actual en la minería chilena.

En la historia de Chile la industria minera ha logrado posicionarse como uno de los rubros más importantes de su economía, tanto por su contribución al PIB, la generación de empleos de calidad y el elevado nivel de inversión en el país (SONAMI; EMOL; El Mercurio, 2012). Es importante destacar que la minería tiene momentos de auge y decaimiento que han sido provocados por factores que abarcan muchos ámbitos, como el productivo, económico, o ambiental.

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa chilena estatal dedicada a la explotación minera de cobre, rubro en el que es la mayor compañía del planeta, concentrando el 7% de las reservas mundiales de cobre, estimando una vida útil para sus yacimientos de aproximadamente 65 años más. Codelco también es el segundo productor mundial de molibdeno. Por todo esto, Codelco es la empresa que más contribuye a la economía chilena.

La producción chilena de cobre desde el año 2005 al año 2014 ha sufrido una disminución constante de la tasa de producción, lo que se ha reflejado en un declive en la participación mundial del cobre chileno (Comisión Chilena del Cobre, 2016). Si bien la producción no ha dejado de crecer en Chile, en muchos otros países lo ha hecho en mucha mayor proporción, mientras que en chile la producción ha crecido en un 8% en países como el Congo se elevó en 956%, China 114%, Zambia 72% y Perú un 37% (Marticorena, 2016). Algunos de los factores que podrían explicar esto corresponden a la etapa de madurez del proceso minero chileno, ya que se estima que los otros países están en una etapa similar a la experimentada en los años 90's en Chile. Los proyectos mineros existentes no pueden mantener el crecimiento de las tasas de producción de esa época y nuevos proyectos se ven complicados por los niveles de inversión actual y el encarecimiento de los recursos críticos para la Industria (Marticorena, 2016). A pesar de que en el periodo 2014-2015 el costo de los elementos críticos para la producción minera se redujo, esta situación no pudo compensar el aumento del gasto en materiales, gastos extras, servicios e insumos y disminución de la ley del cobre, provocando que el costo operacional promedio cambie de 216 c/lb a 225 c/lb (Comisión Chilena del Cobre, 2016). Sumado a lo anterior el precio del cobre ha pasado por muchos ciclos de alza y baja, especialmente en los últimos 5 años; desde el 2011 al 2015 el precio del cobre pasó de estar en 399,66 c/lb a 243 c/lb (Comisión Chilena del Cobre, 2016). Las situaciones anteriores en parte explican la reducción del margen operacional sobre las ventas de las empresas mineras, el cual se mantuvo cercano a un 9% en el 2015, una gran diferencia considerando que en el 2014 alcanzó un 32% (Comisión Chilena del Cobre, 2015). En general, el efecto que tiene la disminución de los ingresos genera riesgos de disminución de la producción, paralización y postergación de proyectos de inversión, se recorta empleo y se moderan las expectativas delos accionistas (Gonzáles, 2015).

5.1.2 Clasificación de la Información.

En esta fase se sintetiza la información recopilada en base a los factores más importantes que tienen inferencia en empresas de, en este paso es necesario rescatar el concepto o idea principal asociado a cada problema:

- Económicos-Financieros: Caída en el Precio del Cobre, Caída de la Productividad, Demanda, Oferta, inversión.
- Socio-Culturales: Licencias Sociales para Operar, Nacionalismo del Recurso.
- Tecnológicos: Innovación Tecnológica, Mejoras Organizacionales.
- Ambientales: Escases de recursos hídricos, Escases de recursos energéticos
- Productivos: Caída en la Ley del Cobre, Disminución en los Niveles de Producción, Aumento en los costos de Producción.

5.2 PASO 2: PRIORIZACIÓN DE VARIABLES PARA LA CREACIÓN DEL MODELO BASE.

Una vez que ha sido aclarado el contexto de la situación a analizar y reconocidos todos los problemas o variables, se priorizan los problemas de acuerdo a si son problemas centrales, causas o consecuencias. La importancia de esta etapa radica en que para poder crear un modelo representativo de muchas de las situaciones problemáticas que surgen en Codelco, se crea un modelo base a partir de los problemas centrales encontrados.

Para el proceso de análisis y desarrollo de esta etapa, se seleccionan aquellas variables o problemas centrales, es decir, los que tienen mayor influencia en la mayoría de las situaciones que afectan a Codelco y a la industria minera. Esto se consigue, por ejemplo, utilizando el método de Matriz de Vester o matriz de relaciones, herramienta que permite clasificar problemas y variables. Basados en esa clasificación se usan los problemas centrales para crear el modelo base, ya que estos problemas están relacionados con todas las otras situaciones. Este proceso es esencial y relevante para simplificar el modelo, pues la selección se basó en comparaciones de las variables, con ayuda de una escala Likert en base a un criterio de relación (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Criterios de Relación.

Valor	Descripción
0	No existe causa
1	Causa débil
2	Causa media
3	Causa fuerte

Con la escala definida se estable la matriz de relaciones donde fueron incluidos los 15 problemas de la lista y el valor de la relación asignada entre ellos (Tabla 5.2), además se incluye el resultado que corresponde a la sumatoria de todas las puntuaciones, la sumatoria de las filas que corresponden al valor en el eje “x” y la sumatoria de las columnas que corresponden al eje “y”:

Tabla 5.2: Matriz de Vester.

N°	Problema	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Resultado Eje X
1	Caída en el Precio del Cobre	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5
2	Caída en la Productividad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2

3	Licencias Sociales Para Operar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	6
4	Nacionalismo del Recurso	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5	Innovación Tecnológica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	4
6	Mejoras Organizativas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	4
7	Escases de Recursos Energéticos	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	6
8	Escases de Recursos Hídricos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
9	Caída en la ley del cobre	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	5
10	Producción	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	7
11	Aumento de los costos de producción	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6
12	Des economías de escala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
13	Demanda	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
14	Oferta	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
15	Inversión	0	0	0	0	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6
	Resultado Eje Y	4	13	2	0	2	2	0	0	0	14	13	2	0	0	13	

Al graficar la información anterior se pueden visualizar los diferentes problemas que pertenecen al modelo base (Figura 5.1).

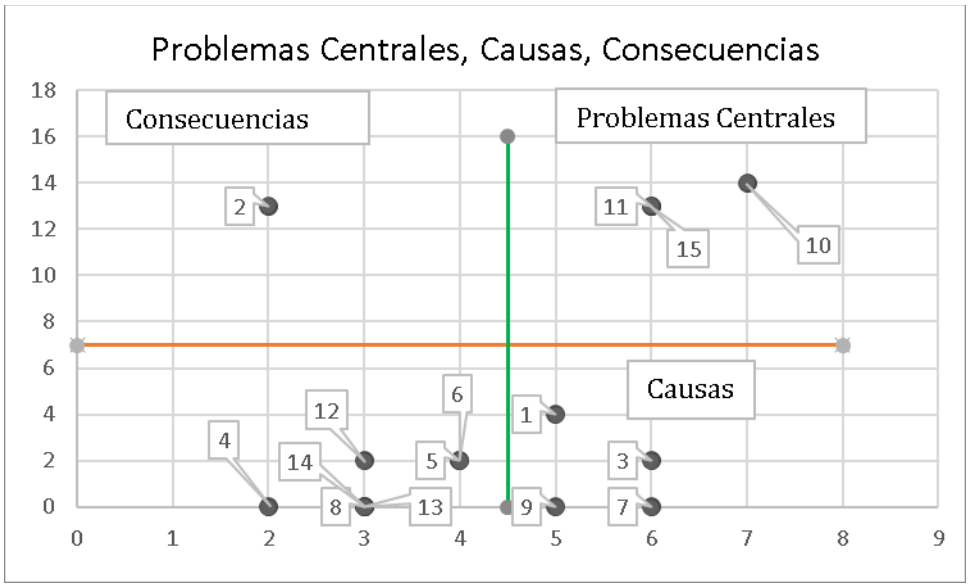


Figura 5.1: Tipos de Problemas.

En la Figura 4.1 se observan los problemas centrales identificados, los cuales fueron: producción (problema 10), aumento en costos de producción (problema 11), e inversión (problema 15). Estos serán la base del nuevo modelo, otro resultado de la Matriz de Vester es un acercamiento a las relaciones de los problemas (indicados con forma de flecha). En relación a las consecuencias y causas se consideraron aquellos eventos más generales y que en primera

medida tuviesen relevancia para el modelo, esto no implica que más adelante los escogidos puedan ser desechados o los no escogidos incluidos en el modelo.

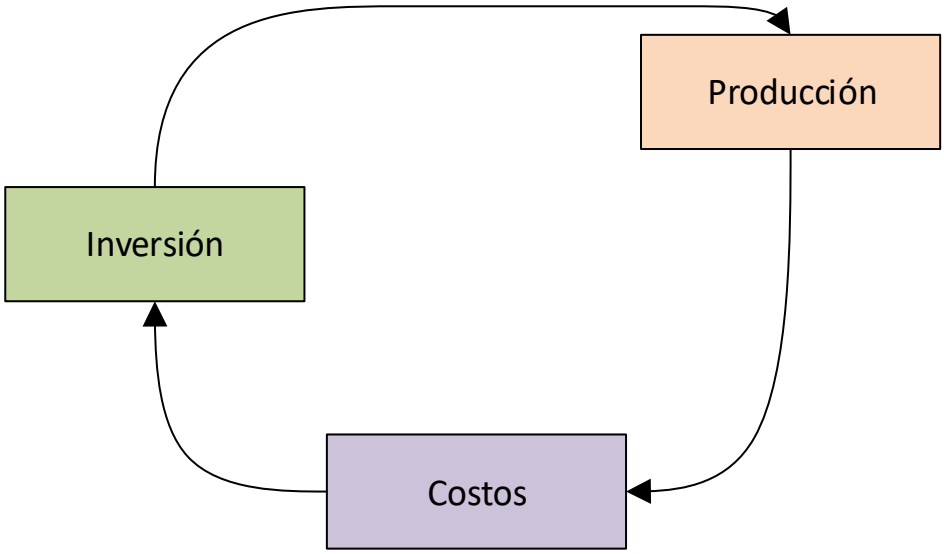


Figura 5.2: Modelo base, resultado de la Matriz de Vester.

En la Figura 5.2 se puede observar que de manera general el modelo base tiene un comportamiento de bucle negativo porque los costos influyen de manera negativa en la inversión, esto es importante ya que demuestra una representación causal más estable y que con el paso del tiempo tiende a crear equilibrio (Aracil & Gordillo, Dinamica de Sistemas, 1997), este equilibrio está relacionado con alcanzar un objetivo, que en este caso corresponde a la producción y cómo las acciones que se tomen con respecto a costos e inversión favorecen la producción o a futuras variables del modelo.

5.3 PASO 3: CREACIÓN DEL MODELO CAUSAL.

Para crear el modelo causal se hace uso del sistema de arquetipos, especialmente la posibilidad de **integrar** muchos de éstos, lo que se puede conseguir al relacionar al menos una variable entre ellos. Para la etapa 1 se identifican aquellos arquetipos que pueden representar cada problema escogido en el paso 2 (Figura 5.2). El modelo causal se crea a partir del trabajo realizado por Naill (1992) donde se establecen relaciones entre inversión y producción para el proceso de extracción de gas natural, esta relación representa a los arquetipos respectivos que son ideales para este trabajo ya que poseen elementos **funcionales** como lo es la extracción de recursos naturales y de **comportamientos** ya que poseen relaciones útiles para el modelo**,** pero adaptados al caso de estudio. A continuación, una explicación del modelo:

Para la sección de producción (Figura 5.4, color rosado), se considera el proceso viabilidad de recursos y reservas minerales reducido a tres variables principales (Figura 5.3), la primera corresponde a "InSitu", es decir todos los recursos inferidos que presentan algún grado de incertidumbre sobre sus características reales, los cuales podrían ser medidos (Canfield, 2012). La segunda variable "Recursos", corresponde a todo el mineral que ya ha sido medido (Canfield, 2012). La cantidad de mineral que pasa de *In situ* a *Recursos* depende de la tasa de descubrimiento que corresponde a la cantidad de cobre anual que se mide como resultado del

proceso exploratorio y esta solo ocurre si la decisión de inversión es aprobada. La tercera variable "Reserva" corresponde a todo el mineral que ya fue probado y que además puede ser extraído (Canfield, 2012). Este proceso depende de una tasa de desarrollo que corresponde a la cantidad anual de cobre que pasa a ser reserva y además del hecho de que existan o no las condiciones para invertir en ese periodo. Finalmente, la variable "Producción" está relacionada con una capacidad de producción que permita cumplir con las metas productivas. A su vez, probablemente se requiera de aumentos de capacidad que se reflejan como retrasos entre la necesidad de un aumento y el que esto se haga realmente efectivo. Además, como este factor está relacionado con tecnología, su tiempo de obsolescencia correspondería a una disminución de la capacidad (Repenning & D., 2001)(Figura 5.4, arquetipo de color rosado). Además, para poder controlar la exploración, el desarrollo y la producción se utilizan las variables: exploración deseada, desarrollo deseado y producción deseada respectivamente, los cuales emulan los planes de producción que adoptan las empresas mineras (Kim & Anderson, System Archetype Basics: From Story to Structure, 1998).

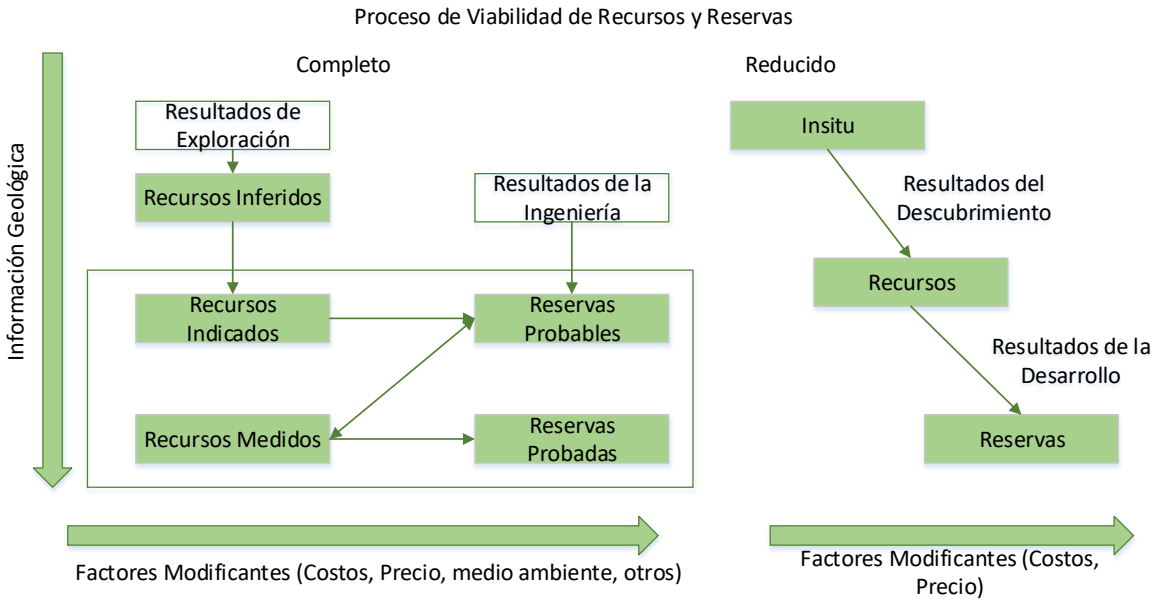


Figura 5.3: Proceso de Viabilidad de Recursos y Reservas: Completo y Reducido.

Para completar el ciclo se relaciona la inversión con los ciclos de costos y producción. En esta etapa, la decisión de invertir en exploración o desarrollo depende de una relación que se genera con los ingresos, los costos y con el riego de invertir en ese momento (Naill, 1992)(Figura 5.4, arquetipo color verde y morado). Finalmente, para complementar el modelo causal se incluye un arquetipo básico de utilidades (Figura 5.4, arquetipo color azul). El total de las variables están presentadas en el Anexo A.

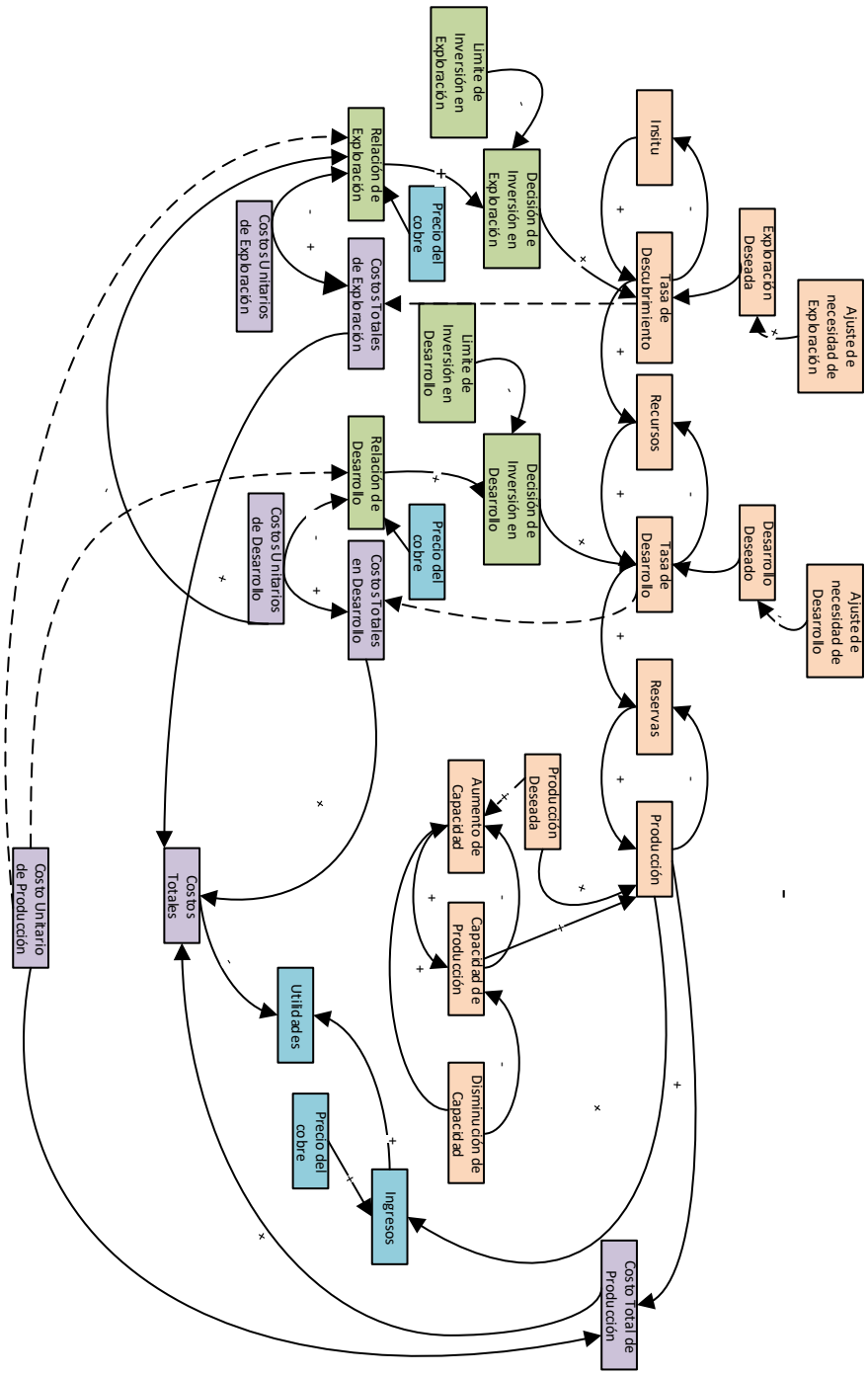


Figura 5.4: Modelo Causal.

5.4 PASO 4: CREACIÓN DEL MODELO CON DINÁMICA DE SISTEMAS.

En este paso se usa el modelo creado en el Paso 3, con el que se crea su análogo utilizando la estructura del diagrama de Forrester, ya que es el lenguaje con el que se trabaja en Vensim (Ventana Systems, Inc., 2015)(Anexo C). Primeramente, se establece a qué tipo pertenecen cada una de las Variables del modelo causal (Anexo A), además se agregan fórmulas y tablas de datos que respetan las relaciones pertinentes para el funcionamiento del modelo. En este último punto se debe tener especial cuidado, ya que el comportamiento no solo está dictado por las relaciones establecidas en el diagrama causal, sino que la forma en la que se comporta cada variable está dictada por las ecuaciones y/o tablas de datos escogidas, lo que otorga variaciones entre casos de estudio, aunque pertenezcan al mismo rubro, en el Anexo A se muestra cada variable, su tipo y ecuación utilizada y en el Anexo B se observa el modelo con dinámica de sistemas.

5.5 PASO 5: VALIDACIÓN DEL MODELO.

En lo que respecta a la etapa de validación del comportamiento, se utiliza para conseguir dos aspectos, primero calibrar aquellos parámetros de los cuales no se posee un valor claro o no hay existencia de registros, por ejemplo, el Costo Unitario de Desarrollo, Límite de Inversión en Desarrollo, Límite de Inversión en Exploración(Figura 5.4) (Anexo A). El segundo aspecto es la comparativa de los resultados del modelo, para ello se contrasta el comportamiento del output *Ingresos* y *Utilidades* con las ventas obtenidas por Codelco (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2016), se evalúa la variable *Ingresos* porque un comportamiento parecido implica que la etapa de producción entregara valores y magnitudes cercanas a la real, por otro lado, se analizan las utilidades porque esta variable considera los diferentes costos y por lo tanto las decisiones de inversión, por lo que un comportamiento parecido da a entender que el resto de los arquetipos igual están cumpliendo con su propósito.

En el gráfico de Ingresos (Figura 5.5), se observa que el output del modelo tiene un comportamiento muy parecido al desempeño real, lo que corresponde a una representación esperada, ya que la variable *Ingresos* está principalmente dictada por el valor del precio que existe en ese momento y cuyos valores son el promedio de cada año, por lo tanto, las diferencias que existen actualmente se deben al plan de producción escogido. Entre el año 2005 al 2008 se presentan las diferencias más grandes donde se desestimó en cierta medida la producción, pero desde el 2008 al 2015 es prácticamente idéntico.

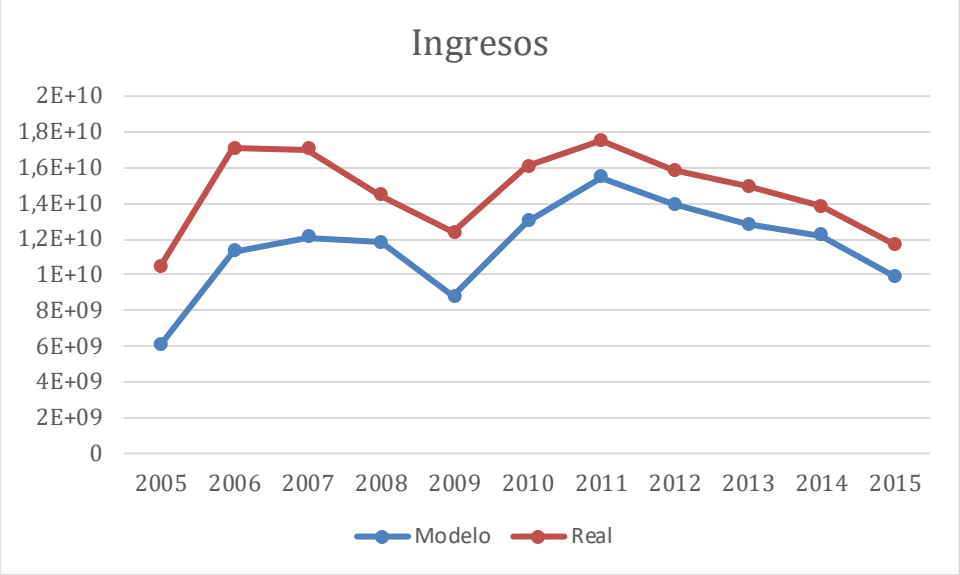


Figura 5.5: Comparativa entre Ingresos Reales vs Ingresos del Modelo.

Con respecto a las Utilidades (Figura 5.6) el comportamiento presenta algunas diferencias que corresponden a situaciones extremas simuladas en los años 2009 y 2011, estas situaciones ocurren principalmente por diferencias entre los costos definidos en el modelo que corresponden a los de exploración, desarrollo y producción que puede diferir en relación a los considerados por Codelco, aun así, el comportamiento esperado del modelo se mantiene, es decir cuando existen ciclos al alza las utilidades suben y en ciclos a la baja bajan en magnitudes parecidas.

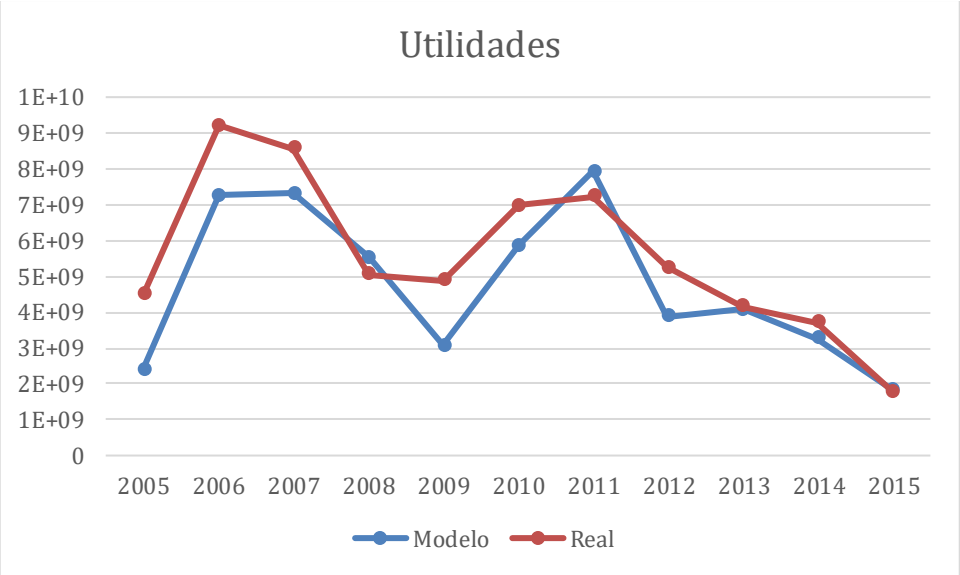


Figura 5.6: Comparativa entre Utilidades Reales y Utilidades del Modelo.

En definitiva, se comprueba que el modelo es estructuralmente válido ya que los pasos 3 y 4 se lograron incorporando arquetipos sistémicos ya utilizados por otros autores, además de variables y parámetros que forman parte de la actividad de Codelco, situación que da coherencia

al modelo. Por otro lado, la etapa de validación de comportamiento entrega tendencias cercanas a las reales por lo que no se observan errores en las relaciones.

5.6 PASO 6: CREACIÓN DE ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Finalmente, y luego de validado el modelo se realizan diferentes análisis dentro de las posibilidades que ofrece la metodología, las cuales son bastante amplias debido al carácter de modelo base y a la representación de los problemas centrales con los que fue creado. Para el análisis escogido se consideran las situaciones de interés nacional para el futuro de la minería, presentadas en un estudio realizado por el Ministerio de Minería, Corfo y Sonami (2014), en el que se plantearon dos incertidumbres: Gobernabilidad y Mercado del Cobre, en un periodo desde el 2015 al 2025, las situaciones son las siguientes:

La Gobernabilidad, es entendida como la relación entre industria y gobierno, gobierno y sociedad civil y cómo ésta afecta a las decisiones de invertir en exploración y desarrollo (Mella Polanco & Berrios Silva, 2013). Una gobernabilidad alta se caracteriza por instituciones gubernamentales, industria y sociedad civil que trabajan de manera conjunta donde existe un sistema caracterizado por la transparencia, apertura y respeto a los procesos democráticos. En el caso de existir problemas éstos se resuelven de manera consensuada y conjunta donde se traza un camino económico, social y ambiental sostenible. En términos de decisiones de inversión, el riesgo de perder la inversión es mínimo. Por el contrario, una baja gobernabilidad deriva en que la sociedad civil perciba a las instituciones gubernamentales como poco transparentes y deshonestas. Las presiones sociales dirigidas hacia las empresas conducen a la ralentización de los proyectos e incluso su paralización, por lo que las decisiones de inversión se vuelven mucho más exigentes dado el riesgo que existe a la fecha.

El mercado del cobre responde a un conjunto de factores, tales como la demanda, oferta, proyectos nuevos, volatilidad del precio, relación con otros metales, productos sustitutos, políticas y costos (Donoso Muñoz, 2013). En respuesta a ese conjunto de elementos, se considera el precio del cobre como un indicador del estado del mercado. Un mercado del cobre fuerte se caracteriza por una alta demanda y una oferta reducida a precios altos, siendo su demanda generada principalmente por países en crecimiento como India, China o algunos países africanos. El precio del cobre ha subido y se ha mantenido bastante alto después de la caída del 2015. Los países emergentes presentan un desarrollo económico lento, esto provoca que exista una sobre oferta de cobre por los altos valores que alcanzó el metal rojo en 2008 y 2011. Además, la investigación científica y tecnológica para desarrollar productos sustitos, también afectan el precio del cobre, por lo que se estima, al 2020 se alcancen los valores más bajos de la historia.

En base a la descripción anterior se analizan los escenarios indicados en la Figura 5.7 y en la Tabla 5.3.

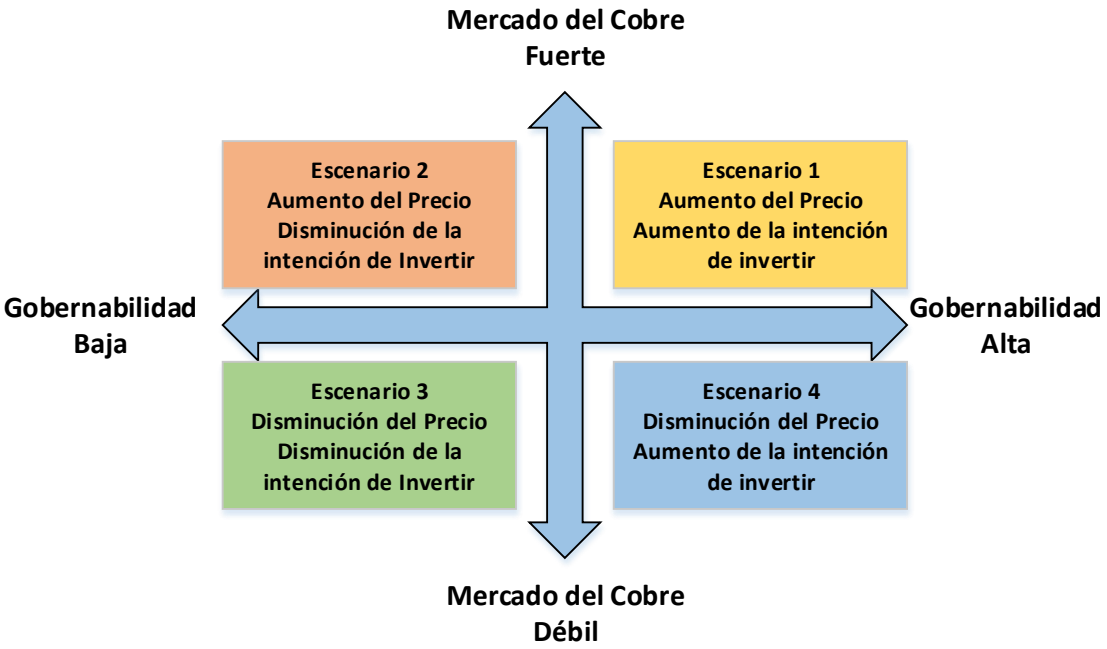


Figura 5.7: Escenarios Modelados.

En resumen, el mercado del cobre se representa por los valores que recibe el precio del metal, y la gobernabilidad se relaciona con los límites de exploración y desarrollo. El comportamiento de cada variable se considera de forma lineal teniendo como límite los valores presentados en la tabla 5.3:

Tabla 5.3: Valores correspondientes a cada escenario.

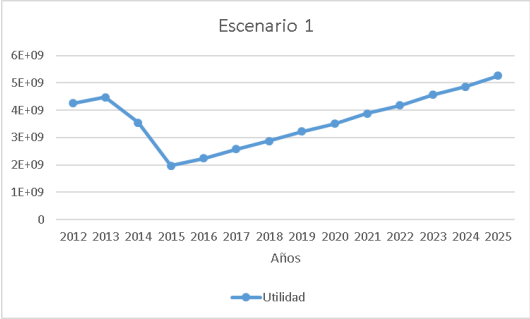
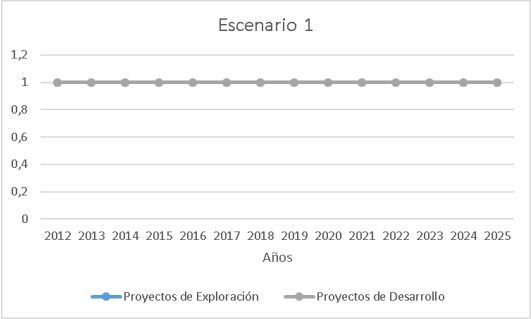
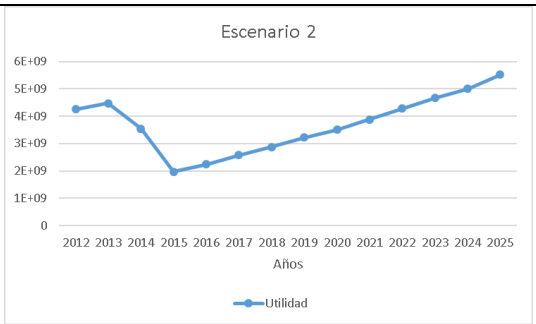
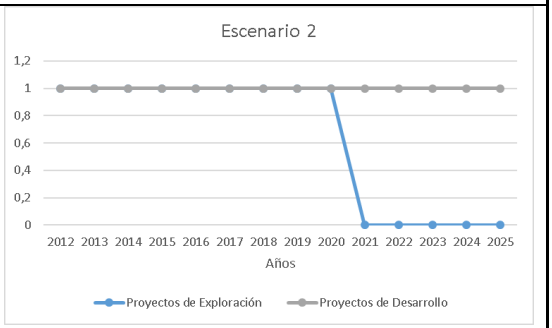
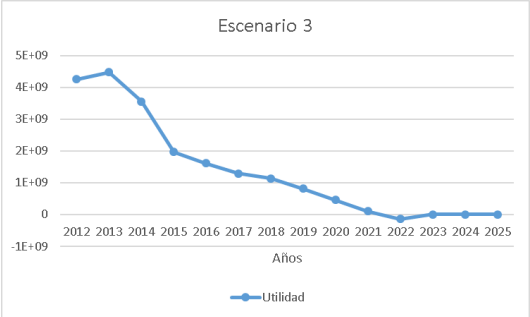
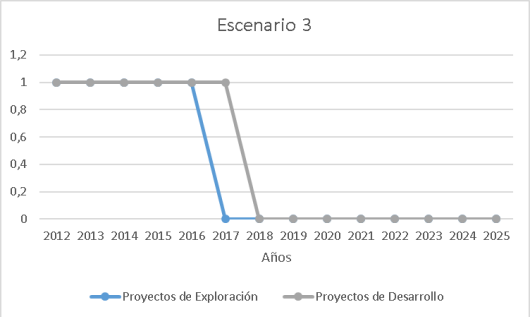
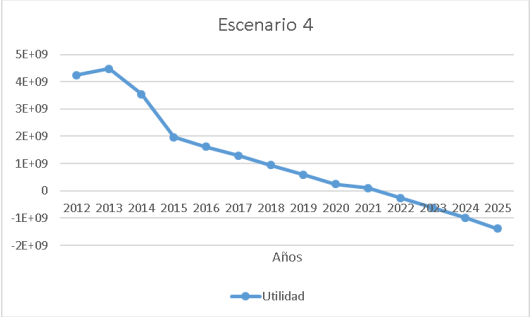
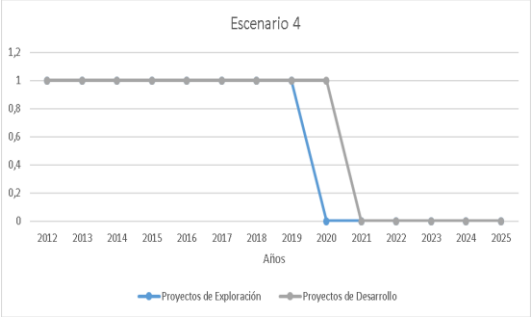
Escenarios	Precio	Límite de Exploración	Límite de Desarrollo
Año 2015	5700	1,1	1,05
Escenario 1	8500	1	1
Escenario 2	8500	1,75	1,4
Escenario 3	4000	1,75	1,4
Escenario 4	4000	1	1

6 RESULTADOS

En el análisis de escenarios del modelo causal se consideraron muchas variables, pero entre las que se ven directamente afectadas por la configuración anterior se encuentran las utilidades, los proyectos de exploración y desarrollo correspondientes a cada año. El concentrado de los resultados generados por cada escenario aparece en la Tabla 6.1. En el escenario 1 se puede observar que las condiciones de mercado y gobernabilidad más altas favorecen la realización de proyectos mineros y las utilidades. En el escenario 2 ya se puede observar lo que ocurre cuando la gobernabilidad baja, en el año 2021 se detendrían las exploraciones ya que los descontentos sociales sumados a las malas condiciones nacionales impedirían la realización de éstos. Sin embargo, esta situación no mermaría el aumento de las utilidades relacionadas al buen precio del cobre, principalmente porque Codelco es una mina madura que posee muchas reservas, lo que permite solventar la falta de exploración. En el escenario 3 y 4 por la caída del precio del cobre las utilidades se ven lógicamente disminuidas, la diferencia ocurre en la cantidad de proyectos de exploración y desarrollo que se aceptan, mientras que en el escenario 3 los proyectos comienzan a detenerse en el 2017, situación que detendría totalmente el funcionamiento de la mina en el año 2023, en el escenario 4 esto ocurre en el 2020, situación que permite mantener la producción por lo menos hasta el año 2025 a pesar de que el funcionamiento de la empresa implique pérdida de utilidades desde el año 2022 en adelante. En este estudio se observa como el precio del cobre es muy importante para la industria, especialmente porque no solo afecta a las utilidades, sino porque un periodo extenso de caída del mismo puede provocar la detención de los proyectos de exploración y desarrollo, situación en que la gobernabilidad puede funcionar como una especie de colchón, pero solo por un par de años ya que se vuelve insostenible al largo plazo. En relación a la baja gobernabilidad, después de varios años podría detener la producción de la empresa.

Se debe dejar en claro que este tipo de modelos se utilizan generalmente para comprender el comportamiento de una situación, más que la exactitud del pronóstico.

Tabla 6.1: Resultados de los escenarios (Utilidades y Proyectos Realizados).

Escenario 1	
	
Escenario 2	
	
Escenario 3	
	
Escenario 4	
	

7 CONCLUSIONES

La metodología propuesta ha sido diseñada para crear un modelo en el que se pudiesen entender escenarios complejos, dentro de un sistema en el que influyen múltiples variables haciendo uso de los arquetipos sistémicos y la dinámica de sistemas. La utilización de estas herramientas se consigue de manera directa, dado que los arquetipos permiten crear modelos causales y la dinámica de sistemas utiliza este tipo de modelos como base para crear un modelo numérico, potenciándose entre sí para conseguir realizar un análisis prospectivo. Además de lo anterior, otro punto fuerte de la metodología expuesta, es que a pesar de que la etapa de diseño posee una estructura, ésta es bastante amplia en cuanto a lo que permite realizar, es decir no limita el número de variables o tamaño de la estructura. Esta situación favorece el uso libre de las propiedades de los arquetipos, lo que no limita la etapa creativa. En este caso el evaluador puede diseñar un modelo que le favorezca en cuanto a los datos que dispone y la experiencia que posee.

Los arquetipos sistémicos son un tema que aún se trabaja entre los investigadores, y que por lo mismo ha variado sus conceptos y propiedades en el tiempo. Uno de los logros y consecuencias de este trabajo fue establecer estas propiedades de manera útil y precisa, eso permitió generar una etapa de diseño del modelo causal eficaz, donde la integración de arquetipos (modelos) de otros autores como el de producción e inversión se transformó en la base de este trabajo. Además, queda claro que, mientras más autores diseñen más modelos para enfrentar distintas situaciones y haciendo uso de las propiedades de los arquetipos, se agiliza el proceso de creación de muchos otros. Otro de los propósitos de la herramienta propuesta fue establecer un modelo que interpretara el mundo minero de manera general y que fuese de fácil uso para otros analistas, es por eso que en la etapa de creación de escenarios haciendo uso de las propiedades y de los arquetipos sistémicos fue posible analizar escenarios mucho más específicos. En este caso, se interpretaron las variables de intención de inversión en las que se incluyeron comportamientos a la alza o baja, según la situación en la que se encontraba la gobernabilidad, por lo que en el modelo ya sea comprendiendo el comportamiento de algunas variables o integrando otros arquetipos (modelos) es posible realizar una gran variedad de estudios, en las que se podrían incluir soluciones o políticas para enfrentar problemas, las que pueden provenir de experiencia de profesionales o de la utilización de otras metodologías.

En cuanto a los resultados de los escenarios analizados se puede observar el fuerte impacto del precio del cobre sobre las utilidades que percibe Codelco lo que queda claro en el escenario 1 y en el escenario 2 donde la baja gobernabilidad no logro atenuar efecto del precio sobre las utilidades. Desde el otro lado con un mercado del cobre débil en el escenario 3 la producción de Codelco se detiene ya que las condiciones del país se vuelven demasiado extremas, pero en el escenario 4 el país tiene una gobernabilidad alta situación que permite mantener la producción por un tiempo mientras existan reservas de mineral a pesar de obtener números rojos esos años por el bajo precio. Es decir, que la gobernabilidad puede suavizar el impacto de la caída del precio del cobre, sin embargo, esto no implica una forma de atenuar dichos problemas, en vista de la forma que tiene el modelo y los comportamientos escogidos, buenas políticas a analizar serían algunas de mejora en la productividad o reducción de costos.

8 REFERENCIAS

Aracil, J. (2005). *Dinámica de Sistemas.* Madrid.

Aracil, J., & Gordillo, F. (1997). *Dinamica de Sistemas.* Alianza.

Brandmaier, A. M., von Oertzen, T., McArdle, J. J., & Lindenberger, U. (2013). Structural equation model trees. *Psychological Methods*, 71-86.

Bustamante, M. (2006). *Análisis Estratégico: Metodología de Análisis Prospectivo.* Talca.

Canavos, G. C., & Medal, E. G. (1987). *Probabilidad y estadística.* McGraw Hill.

Canfield, M. (2012). Etapas del Proceso Productivo de una Mina. *Curso de Minería para Periodistas, SONAMI.* Santiago. Obtenido de http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/04/01.-Etapas-del-Proceso-Productivo-de-una-Mina.pdf

Christensen, C. (2013). The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail. *Harvard Business Review*.

Chung Pinzás, A. (2009). Prospectiva Estratégica: más allá del plan estratégico. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 27-31.

Cole, A. (2006). The Influence Matrix Methodology: a technical report. Palmerston North, New Zealand: Landcare Research.

Comisión Chilena del Cobre. (2013). *Chile: País atractivo para las inversiones mineras.* Santiago.

Comisión Chilena del Cobre. (2015). *Caracterizacón de los costos de la gran minería del cobre.* Obtenido de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe_caracterizacion_de_los_costos.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2016). *Cochilco*. Obtenido de http://www.cochilco.cl/

Comisión Chilena del Cobre. (2016). *Estudio de Insumos Criticos en la Mineria Chilena.* Obtenido de https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Estudio_Insumos_Cr%C3%ADticos_2016v2.pdf

David, F. R. (2003). *Conceptos de Administración Estratégica.* México: Pearson Educación.

Donoso Muñoz, M. J. (2013). El Mercado del Cobre Mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniere. Revista chilena de ingeniería*, 248-261.

Flores, H. R. (2013). Métodos y modelado matemático para el análisis de procesos complejos en las organizaciones. *Clerinet*, 64-69.

Forrester, J. W. (15 de Diciembre de 1998). Diseñando el Futuro. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Godet, M. (2007). *Prospectiva Estratégica: problemas y métodos.* San Sebastián: PROSPEKTIKER.

Godoy, L. A., & Bartó, C. A. (2002). Validación y Valoración de modelos en la Dinámica de Sistemas. *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*, 31-47.

Gonzáles, F. (18 de Noviembre de 2015). *La Tercera*. Obtenido de http://www.latercera.com/noticia/nacional/2015/11/680-656405-9-alvaro-merino-gerente-de-estudios-de-sonami-esperamos-tres-anos-complejos.shtml

Jablonka, E. (2007). The relevance of modelling and applications: Relevant to whom and for what purpose? *Modelling and Applications in Mathematics Education*, 193-200.

Kim, D., & Anderson, V. (1998). *System Archetype Basics: From Story to Structure.* Whaltham, Massachusetts: Pegasus Communications, Inc.

Kim, D., & Burchill, G. (1992). System Archetypes as a Diagnostic Tool: A Field-based Study of TQM Implementations. *Proceedings System Dynamics 1992*, 311-320.

Marticorena, J. (17 de Enero de 2016). *La Tercera*. Obtenido de http://www.latercera.com/noticia/negocios/2016/01/655-664520-9-chile-pierde-terreno-como-productor-de-cobre-en-medio-del-desplome-del-metal.shtml

Mejía, A., & Díaz, G. (2006). Tipos de Arcos y hacia dónde disparan: Sobre la naturaleza y las posibilidades de los arquetipos. *4° Congreso Anual del Capítulo Latinoamericano de la Sociedad de Dinámica de Sistemas.* Cancún.

Mella Polanco, M., & Berrios Silva, C. (2013). Gobernabilidad, democratización y conflictividad social en Chile: escenarios posibles para un nuevo equilibrio. *Polis*, 429-458.

Naill, R. F. (1992). A system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, 1-19.

Repenning, N., & D., S. J. (2001). Nobody Ever Gets Credit for Fixing Problems that Never Happened: Creating and Sustaining Process Improvement. *California Management Review*, 64-88.

Santa Catalina, I. M. (Septiembre de 2010). Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria.

Senge, P. M. (1990). *The Fifth Discipline.* Doubleday Business.

SONAMI; EMOL; El Mercurio. (10 de Junio de 2012). Chile, País Minero. *El Mercurio*, págs. 1-22.

Ventana Systems, Inc. (2015). *http://vensim.com*. Obtenido de http://vensim.com/faq/

Vergara Schmalbach, J. C., Fontalvo Herrera, T. J., & Maza Ávila, F. (2010). La Planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas. *Prospectiva*, 21-29.

Wolstenholme, E. (2003). Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. *System Dynamics Review* , 7-26.

Wolstenholme, E. (2004). Using generic system archetypes to support thinking and modelling. *System Dynamics Review*, 341-356.

9 ANEXO A: VARIABLES DEL MODELO

A continuación, se muestran las variables que fueron introducidas en el modelo, descripción y relación matemática:

Tabla 9.1: Variables, tipos, descripciones y ecuaciones del modelo.

Variable	Tipo	Descripción	Ecuación
Ajuste Necesidad de Desarrollo	Auxiliar	Tiempo de duración de la actividad en la mina	40
Ajuste Necesidad de Exploración	Auxiliar	Tiempo de duración de la extracción de minerales	30
Aumento Capacidad	Flujo	Aumento de la capacidad de producción necesaria para cumplir con la producción deseada	DELAY1(MAX (0, Producción deseada + Disminución Capacidad -Capacidad de Producción), 0.5)
Capacidad de Producción	Nivel	Cantidad Máxima de mineral que puede producir la empresa	INTEG (Aumento Capacidad -Disminución Cap,1.6e+006)
Costo Total en Desarrollo	Auxiliar	Costo para el total del mineral desarrollado	Tasa de desarrollo*Costo Unitario de Desarrollo
Costo Total de Producción	Auxiliar	Costo para el total de la producción de cobre en ese momento	Producción*Costo Unitario de Producción
Costo Unitario de Desarrollo	Auxiliar	Costo por unidad de tonelada desarrollado en ese momento	10
Costo Unitario de Producción	Auxiliar	Costo por unidad de tonelada producida, los datos son introducidos por medio de una tabla.	WITH LOOKUP (Time, ([(1998,1400) -(2020,6000)], (1999,1426.64) ,(2000,1439.86),(2001,1446.48),(2002,1360.48),(2003,1620.67),(2004,1792.66),(2005,2156.49),(2006,2548.98),(2007,3137.71),(2008,3924.9),(2009,3479),(2010,4357),(2011,4533.48),(2012,5832.22),(2013,5104.57),(2014,5084.73),(2015,4476.15))
Costos Totales	Auxiliar	Costo de toda la actividad minera	Costo Total de Producción + Costo en desarrollo +Costos Totales de Exploración
Costos Totales de Exploración	Auxiliar	Costo total de la actividad de exploración	Tasa de descubrimiento * Costos Unitarios de Exploración
Costos Unitarios de Exploración	Auxiliar	Costo por unidad de tonelada en exploración	20
Decisión de Inversión en Exploración	Auxiliar	Se decide si se invierte en exploración o no en ese momento	IF THEN ELSE (Relación de Exploración>=Limite de Inversión en Exploración, 1, 0)
Desarrollo Deseado	Auxiliar	Cantidad de recursos que la empresa tiene planificado desarrollar	1e+006+RAMP (150000, 2000, 2000+Ajuste Necesidad de Desarrollo)
Decisión de Inversión en Desarrollo	Auxiliar	Se decide si se invierte en desarrollo o no en ese momento	IF THEN ELSE (Relación de desarrollo>=Limite de Inversión en Desarrollo, 1, 0)
Disminución Capacidad	Flujo	Obsolescencia de la capacidad de producción	25
Exploración deseada	Auxiliar	Cantidad de mineral que la empresa tiene deseado explorar	1e+006+RAMP (200000, 2000, 2000+Ajuste Necesidad de Exploración)
In Situ	Nivel	Cantidad de mineral en la Tierra	INTEG (-Tasa de descubrimiento, Mineral Inicial)
Ingresos	Auxiliar		Precio del Cobre*Producción
Límite de Inversión en Desarrollo	Auxiliar	Mínimo	1.05
Límite de Inversión en	Auxiliar	Mínimo	1.1

Exploración			
Mineral Inicial	Auxiliar	Cantidad máxima de mineral en un sector	6,00E+07
Precio del Cobre	Auxiliar	Valor por tonelada del cobre	WITH LOOKUP (([(1999,60) -(2020,9000)], (1999,1573.9), (2000,1814.11), (2001,1578.11), (2002,1557.83), (2003,1780.09), (2004,2870.91), (2005,3684.5), (2006,6731.86), (2007,5832.22), (2013,5104.57), (2014,5084.73), (2015,4476.15))
Producción	Flujo		MIN (Capacidad de Producción, MIN (Producción deseada, Reservas Comprobadas))
Producción deseada	Auxiliar	Cantidad de cobre que se planea producir en ese periodo	WITH LOOKUP (Time, ([(1999,0) -(2020,2e+006)], (1999,1.6e+006), (2015,1.8e+006)))
Recursos	Nivel	Cantidad de mineral que puede ser transformado en reserva	INTEG (Tasa de descubrimiento - Tasa de desarrollo, Recursos Iniciales)
Recursos Iniciales	Auxiliar	Cantidad de recursos en el año que comienza la simulación	1,00E+07
Relación de desarrollo	Auxiliar	Predisposición a invertir en desarrollo en ese momento	Precio del Cobre/ (Costo Unitario de Producción + Costo Unitario de Desarrollo)
Relación de Exploración	Auxiliar	Predisposición a invertir en exploración ese momento	Precio del Cobre/ (Costo Unitario de Producción + Costos Unitarios de Exploración + Costo Unitario de Desarrollo)
Reservas Comprobadas	Nivel	Cantidad de Reservas listas para ser transformadas en Cobre comercial	INTEG (Tasa de desarrollo-Producción,4e+006)
Tasa de desarrollo	Flujo	Recursos que son transformados en reservas	MIN (Recursos, Desarrollo Deseado) *Decisión de Inversión en Desarrollo
Tasa de descubrimiento	Flujo	Mineral que es transformado en recursos	MIN (Recursos, Desarrollo Deseado) *Decisión de Inversión en Desarrollo
Utilidades	Auxiliar	Diferencia entre ingresos y costos	Ingresos-Costos Totales

10 ANEXO B: MODELO CON DINÁMICA DE SISTEMAS

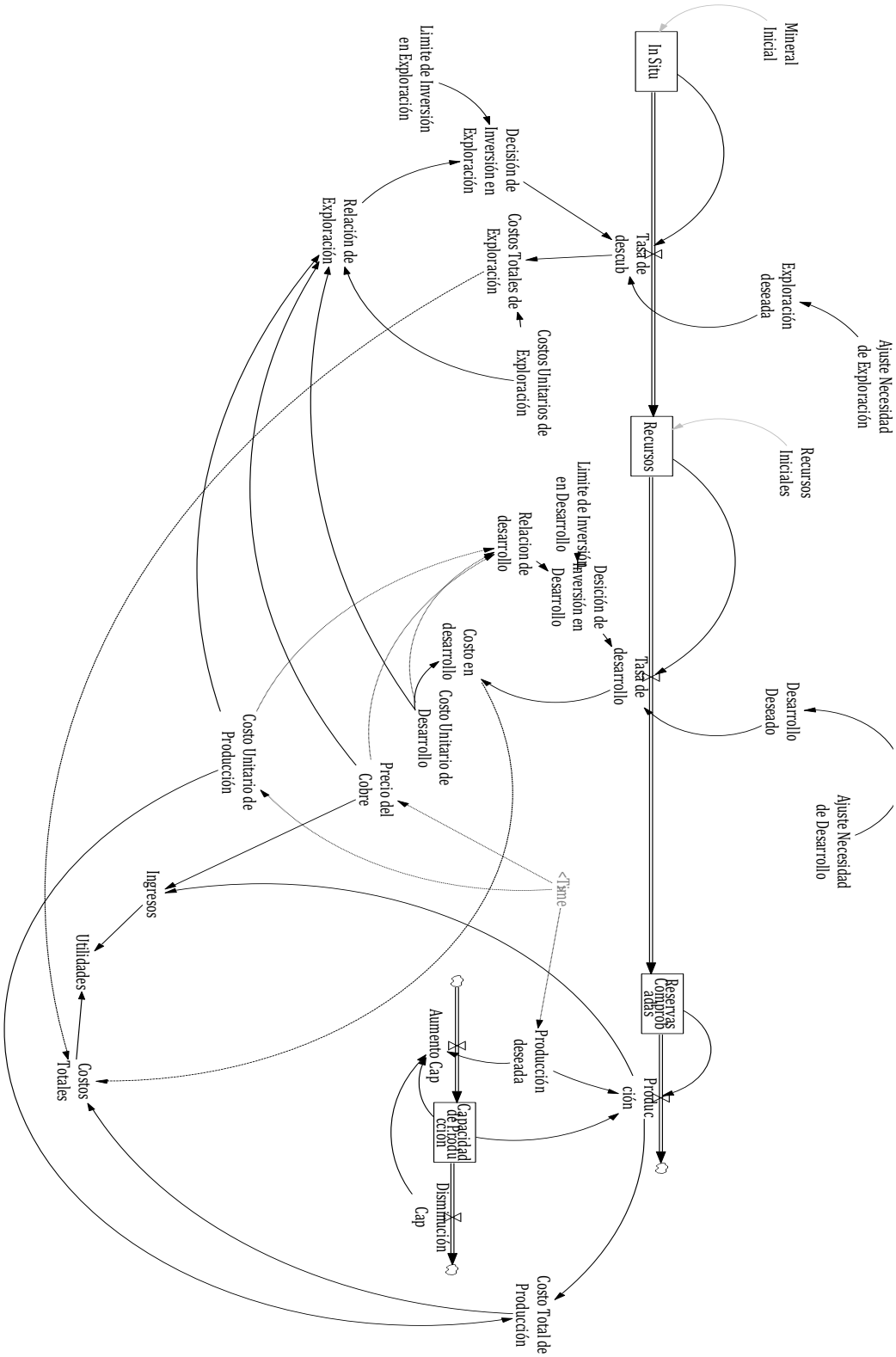


Figura 10.1: Modelo con dinámica de sistemas.

11 ANEXO C: SOFTWARE VENSIM

Vensim es un software utilizado para crear modelos de simulación con dinámica de sistemas, cumple su función a partir de un diseño gráfico con una interfaz simple y amigable, posee múltiples herramientas como editores de ecuaciones, escenarios, gráficos, tablas de datos y en las versiones profesionales se encuentran disponibles herramientas que permiten análisis estadísticos y de sensibilidad.

En la siguiente grafica se muestra la interfaz con un modelo realizados, que posee todas las características de la dinámica de sistemas.

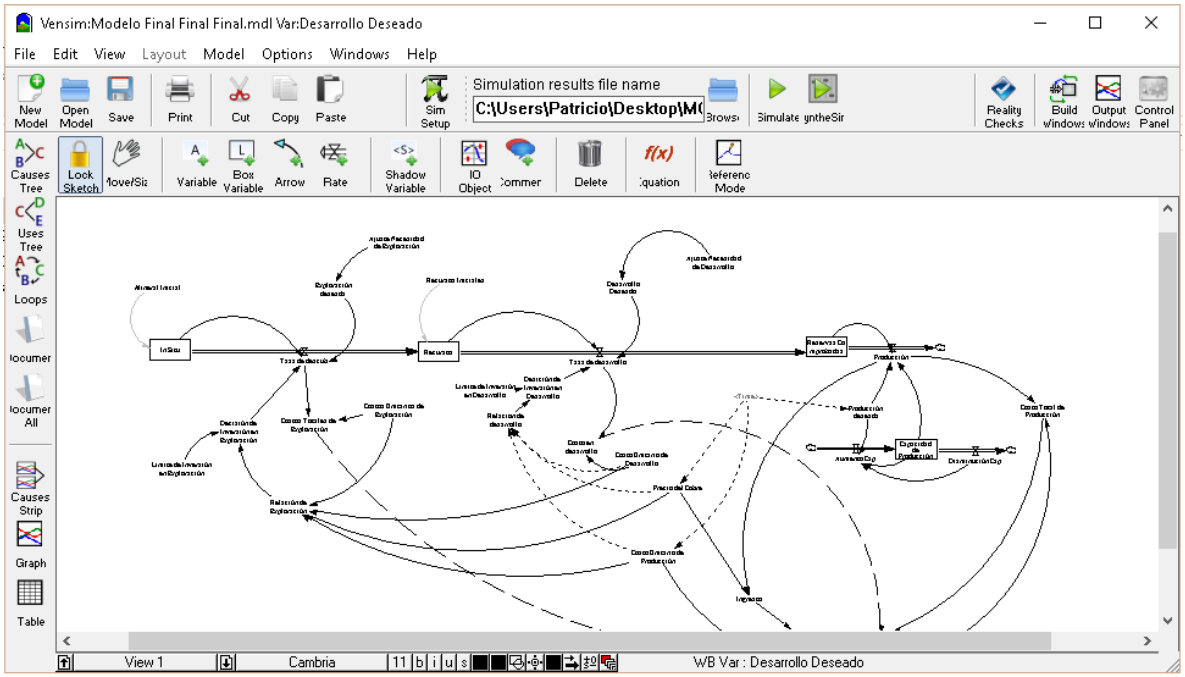


Figura 11.1: Interfaz gráfica software Vensim.

Para crear el modelo se utiliza el siguiente cuadro, donde se encuentran las variables de nivel (Box Variable), de flujo(Rate) y auxiliares(Variable), además del conector de todas las variables (Arrow).

Figura 11.2: Tipos de Variables.

Para el ingreso de tablas, gráficos y ecuaciones se utiliza la siguiente interfaz.

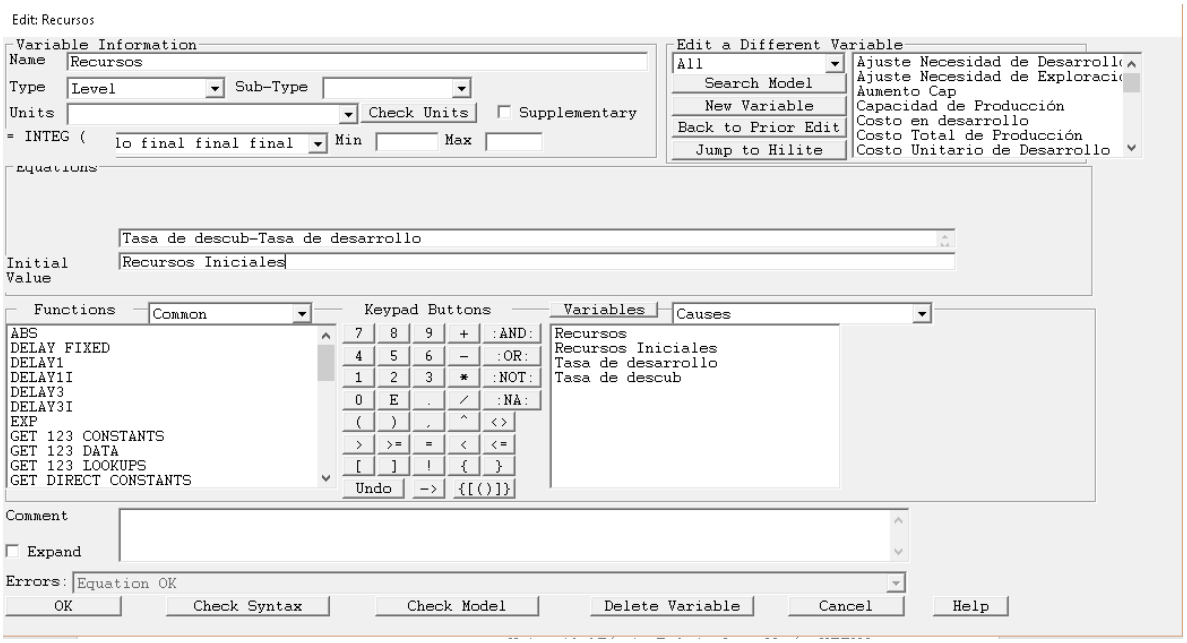


Figura 11.3: Interfaz de edición de variables.

La cual además de poder integrar las 3 cosas anteriores permite ingresar un gran número de funciones predefinidas, entre las más utilizadas se encuentran:

- Abs: Calcula el valor absoluto de una función.
- Delay: Considera un retraso en la información que se entrega.
- Exp: Calcula el valor exponencial de una función.
- If Then Else: Entrega un valor si se cumple una condición de lo contrario entrega otro.
- Min: entrega el valor mínimo entre dos valores.
- Max: entrega el valor máximo entre dos valores.

12 ANEXO D: RESULTADOS

A continuación, se presentan algunos de los comportamientos de otras variables que fueron utilizados en el modelo:

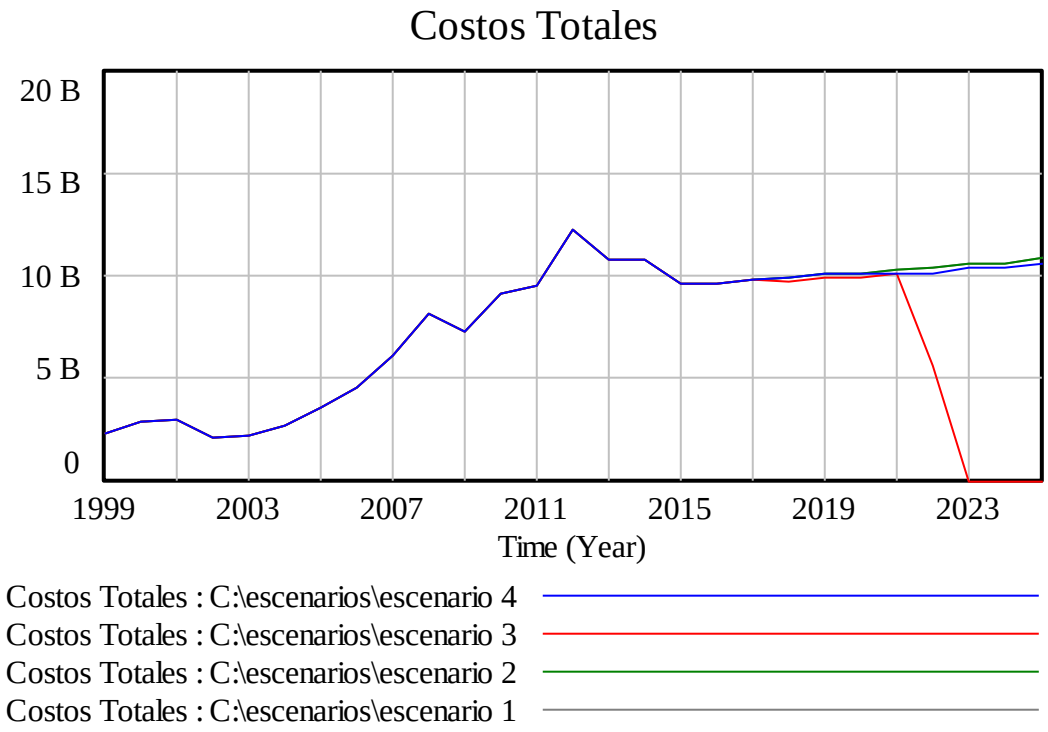


Figura 12.1: Costos Totales.

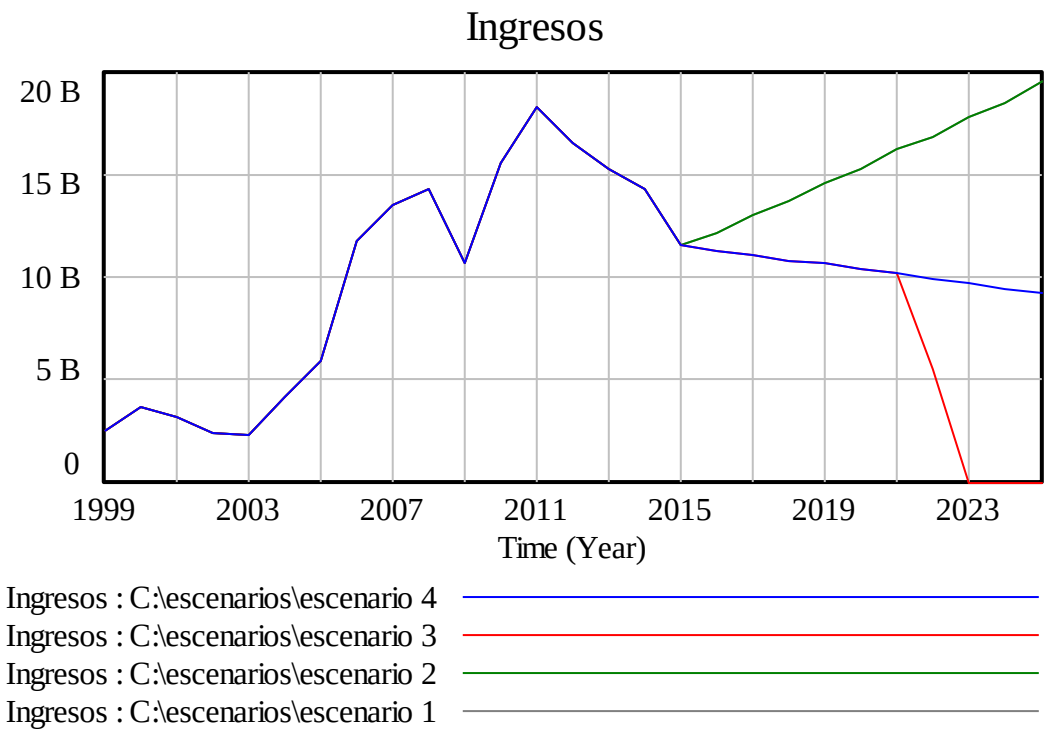


Figura 12.2: Ingresos.

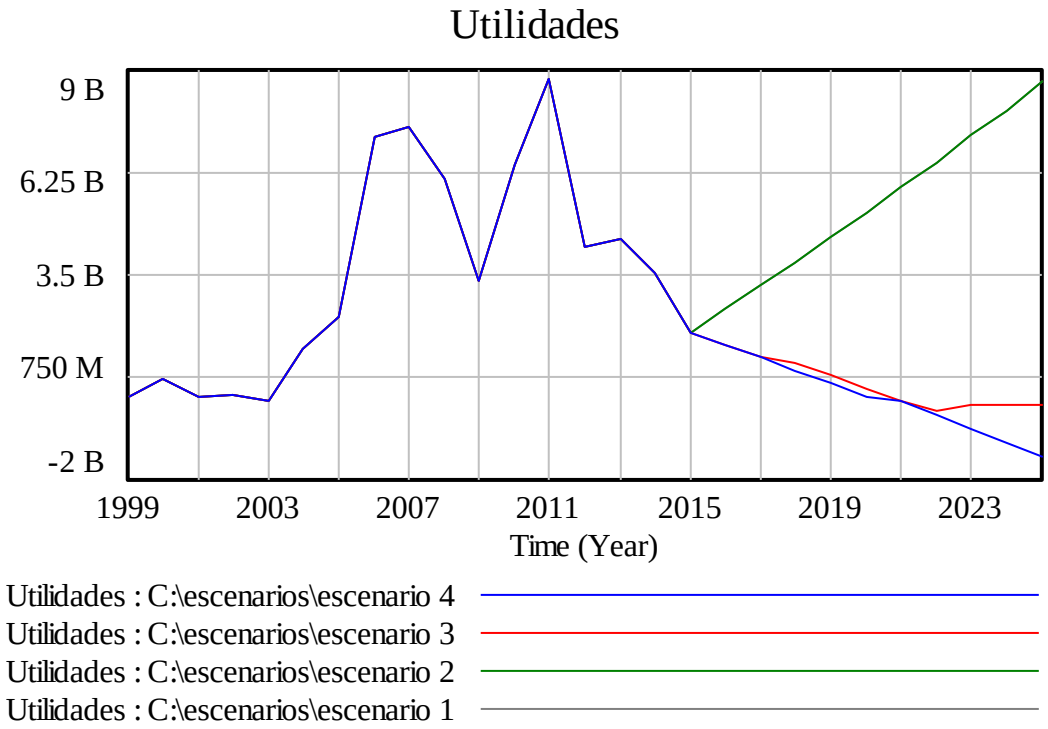


Figura 12.3: Utilidades.

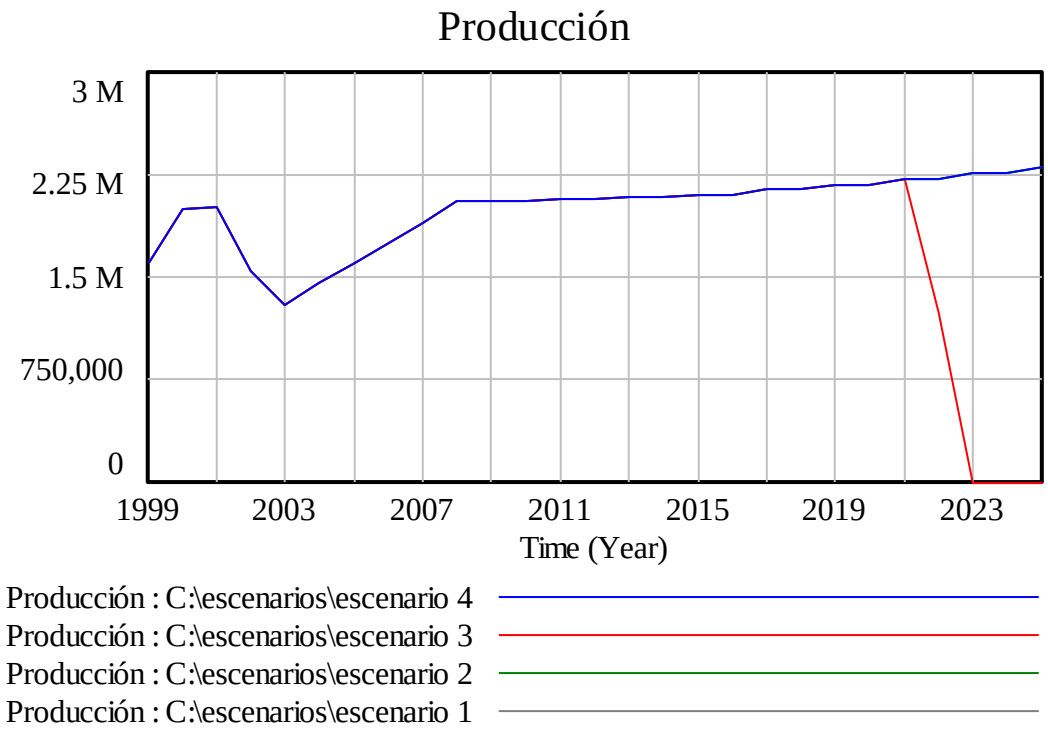


Figura 12.4: Producción.

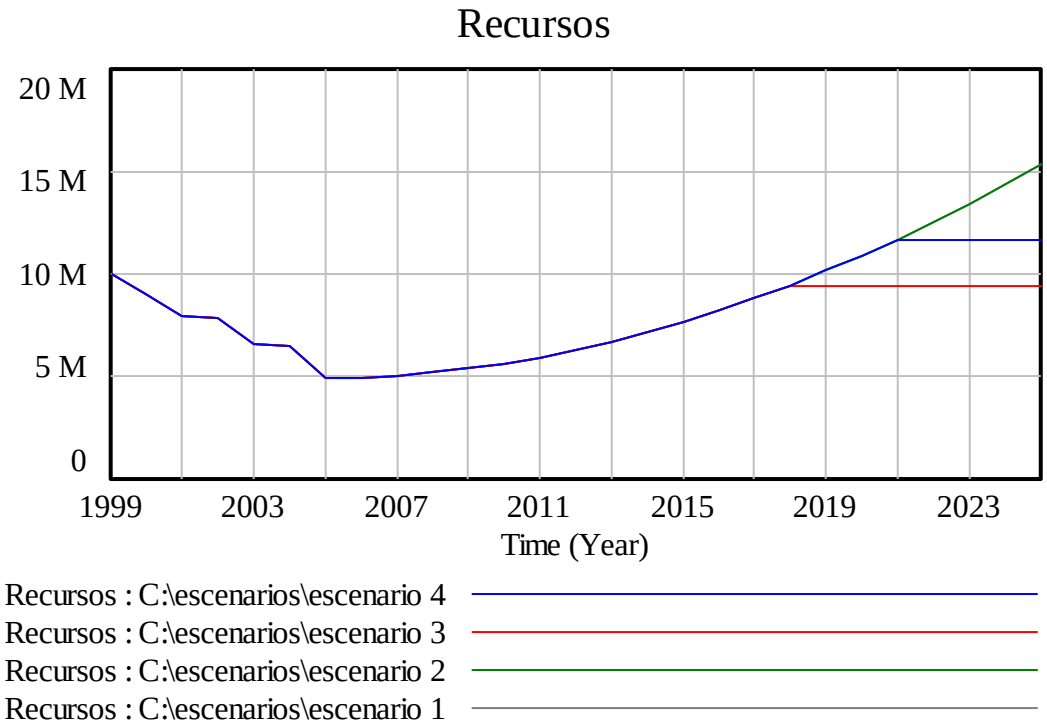


Figura 12.5: Recursos.

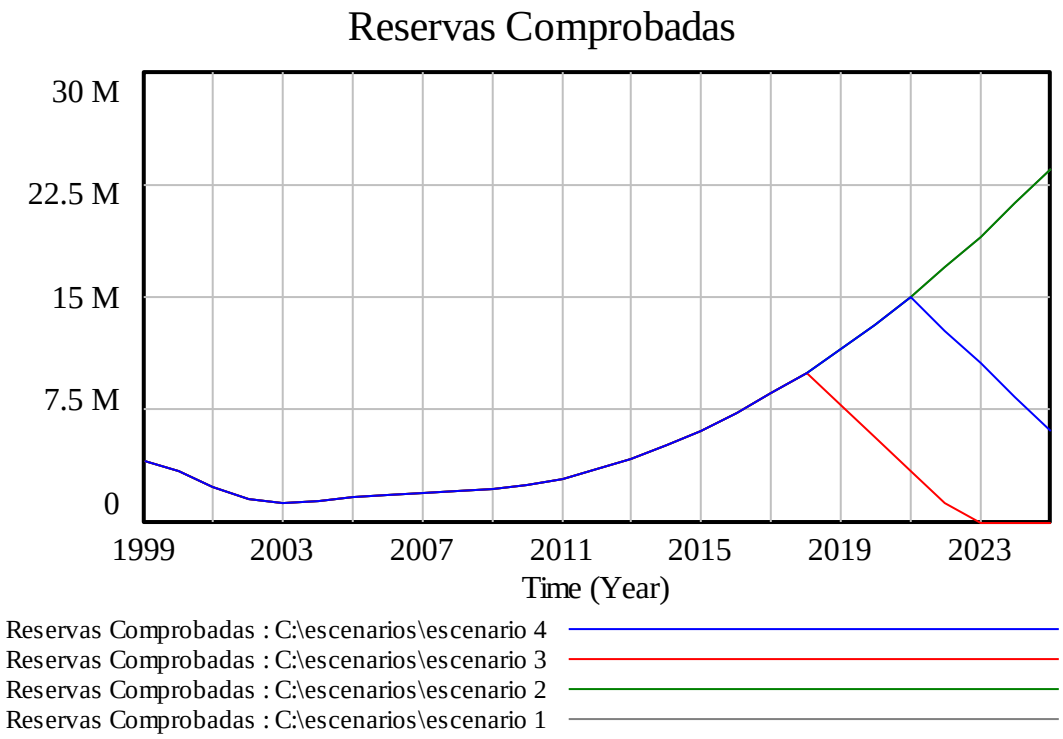


Figura 12.6: Reservas.

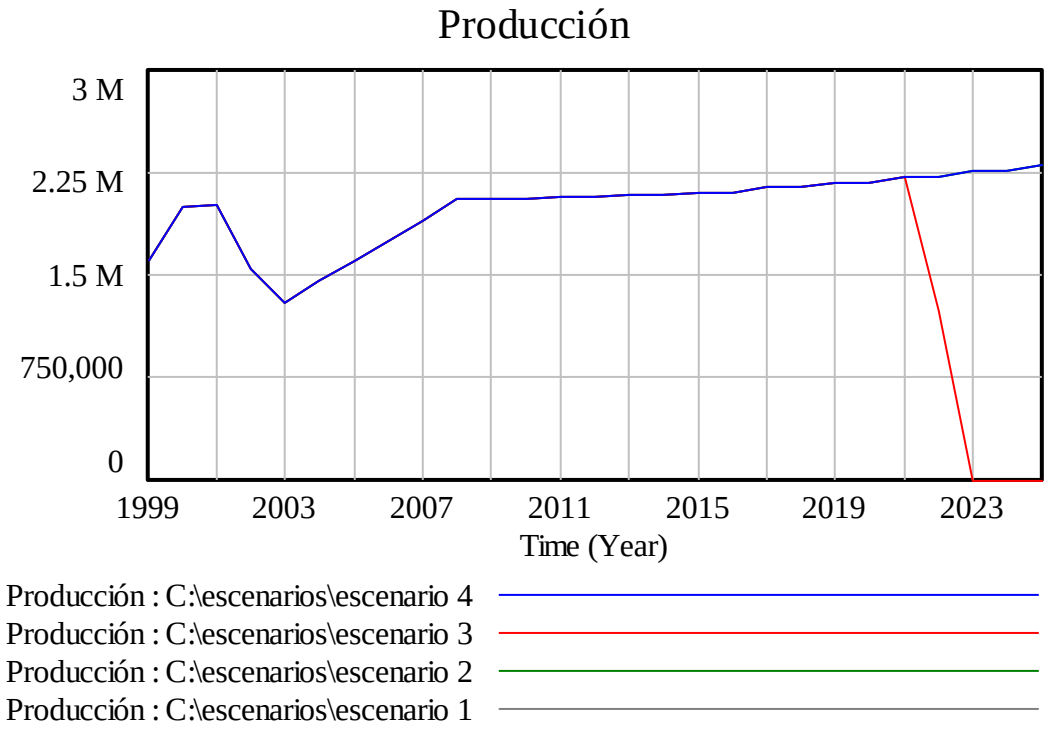


Figura 12.7: Producción.

13 ANEXO E: DINÁMICA DE SISTEMAS

El origen más básico de este método proviene de la teoría general de sistemas, en esta se especifica que el sistema es una estructura con funciones o propiedades adquiridas por la relación de las partes, características sinérgicas, del sistema. Este concepto se refiere a un conjunto de relaciones entre elementos o subsistemas, sus funciones o procesos y productos en interacción con el ambiente (Bertalanffi, 1968), por otro lado, se hace una locución al dinamismo que deben tener estas variables ósea que no se mantienen constantes en el tiempo por el mismo efecto que de las relaciones antes mencionadas.

El método de la dinámica de sistemas se preocupa de analizar como las influencias de las partes de un sistema provocan cambios en el sistema que son reflejos del mismo, en otras palabras, se puede entender como la proporción en que una variable afecta a otra y esta a su vez se ve afectada por la misma o por otras y además de lo anterior se debe analizar las relaciones que son los que determinan la estructura que tendrá el sistema , la dinámica de sistemas se preocupa de conciliar estas dos partes en un solo modelo (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005).

Entonces es fundamental para la correcta creación del modelo comprender cada una de sus características y el lenguaje utilizado para poder cumplir con los requerimientos de estructura e influencia que se acomoden de mejor manera al problema que deseamos abarcar, generalmente están compuestos por diagramas causales, bucles, variables de diferentes tipos y relaciones matemáticas.

Diagramas Causales

Corresponden a la mejor manera de graficar las relaciones que existen al interior del sistema o entre sistemas especialmente porque permite ilustrar la interacción cíclica o retroalimentación, este movimiento circular será denominado bucle, el sentido de esta interacción se indicará con una punta de flecha en la posición que corresponda y además se indicará con un signo positivo si el aumento de una implica el aumento de otra y en caso contrario con un signo negativo. En la siguiente figura se ilustra lo antes mencionado:

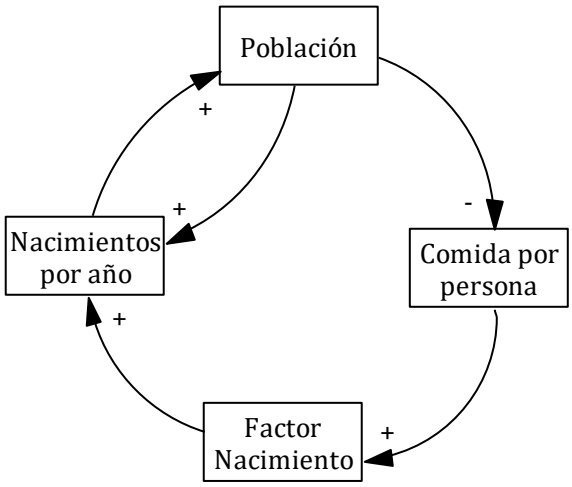


Figura 13.1: Diagrama Causal de la población versus la comida por persona.

Además, en la Figura 13.1 se puede observar otra característica importante para la creación de un diagrama causal, para que un diagrama causal este correcto además de existir una relación matemática entre dos partes es fundamental que exista causalidad ósea una relación conceptual y por esta misma razón es fundamental que la persona que va a construir un modelo sea un experto en el área o siga alguna metodología de construcción para establecer las mejores relaciones causales.

Bucles

Un bucle correspondería a un conjunto de relaciones causales cerrada ósea en la que no se puede vislumbrar un origen o un final, forma o estructura fundamental en dinámica de sistemas y que entrega el carácter cíclico al modelo (García, 2003).

Existen dos tipos de bucles los de refuerzo o realimentación positiva y los de o realimentación negativa.

Bucle de realimentación negativa

Corresponde a aquellos bucles donde contiene un número impar de relaciones negativas. En la Figura 13.1 se puede observar que A refuerza a B, B a C y C provoca una variación negativa en A la característica principal de este tipo de bucle es que generan equilibrio en un sistema ósea que tienden a estabilizarlo, el comportamiento de este tipo de bucle se observa en la Figura 13.2, donde a medida que pasa el tiempo el efecto de C sobre A anula las otras dos relaciones positivas (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005).

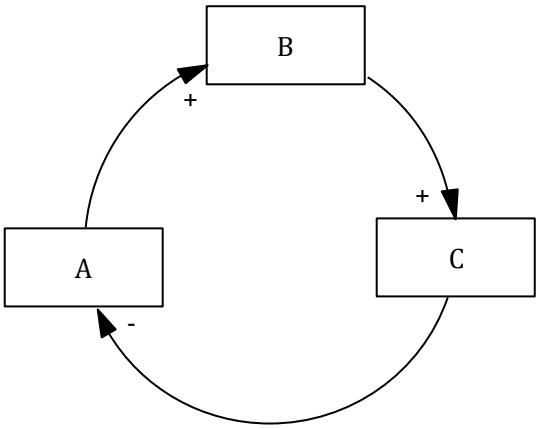


Figura 13.2: Bucle de realimentación negativa.

Bucle de realimentación positiva

Corresponde a aquellos bucles donde todas sus relaciones son de tipo positiva o si el número de relaciones es negativo también se considera positivo. En la figura 13.3 se puede observar como A refuerza a B, B a C y finalmente C a A lo correspondería a un bucle de este tipo, si se considera una cantidad considerable de tiempo se puede notar que el refuerzo de cualquiera de sus variables tendería al infinito lo que en términos de sistemas se puede considerar como una desestabilización la que gráficamente tendría la forma de la figura 13.3 (Aracil, Dinámica de Sistemas, 2005).

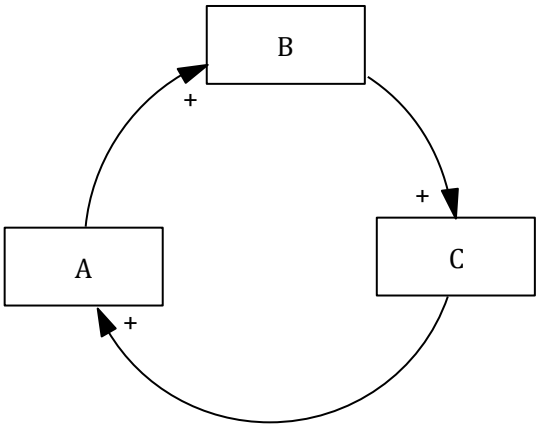


Figura 13.3: Bucle de realimentación positiva.

Diagramas de flujos y variables

El diagrama de Flujo es la representación utilizada en dinámica de sistemas, puede considerarse el paso siguiente a la creación del diagrama causal, en esta se definen los tipos de variables que se relacionan, estos serían variables de nivel, flujo y auxiliares.

Variables de nivel y estado

Corresponden a variables de acumulación o de retención de material, este tipo de variables son muy significativas para el sistema ya que generalmente representan al problema principal que se desea tratar, por ejemplo, la población de conejos en un problema de natalidad y mortalidad.

Estas variables están regidas por la siguiente ecuación de Nivel:

$$N(t) = N\,(t_0) + \int_{t_0}^{t} Fe(t) - Fs\,(t\,)\,dt = N\,(t_0) + (Fe(t) - Fs\,(t\,))\Delta t \qquad (13.1)$$

Variables de flujo

Las Variables de flujo determinan las variaciones en los niveles del sistema, ya sea por flujos de entrada, flujos de salida o los dos a la vez. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Las variables de flujo determinan cómo se convierte la información disponible en una acción o actuación.

Como características de este tipo de variables se puede destacar que admiten variables de nivel y auxiliares pero dos variables de flujo no se pueden conectar entre sí, sus unidades siempre deberán ser consistentes a las unidades de las variables de nivel divida por las unidades de tiempo.

La ecuación que representa a las variables de flujo es la siguiente:

$$F = \frac{dM}{dt} \tag{13.2}$$

Variables auxiliares

Este tipo de variables son utilizadas como apoyo para las variables de flujo y variables de nivel además de hacer más fácil la comprensión de estas mismas variables.

14 ANEXO F: ARQUETIPOS SISTÉMICOS

A continuación, se presentan las estructuras básicas de los arquetipos sistémicos:

Límites de crecimiento

Un proceso se alimenta de sí mismo para producir un período de crecimiento o expansión acelerada. Luego el crecimiento se vuelve más lento y puede detenerse o se revierte e inicia un colapso acelerado. La fase de crecimiento es causada por uno o varios procesos de realimentación reforzadora. La desaceleración surge por un proceso compensador que se activa cuando se llega a un "límite". El límite puede ser una restricción en los recursos, o una reacción externa o interna ante el crecimiento. El colapso acelerado surge del proceso reforzador que se revierte una vez alcanzado el límite.

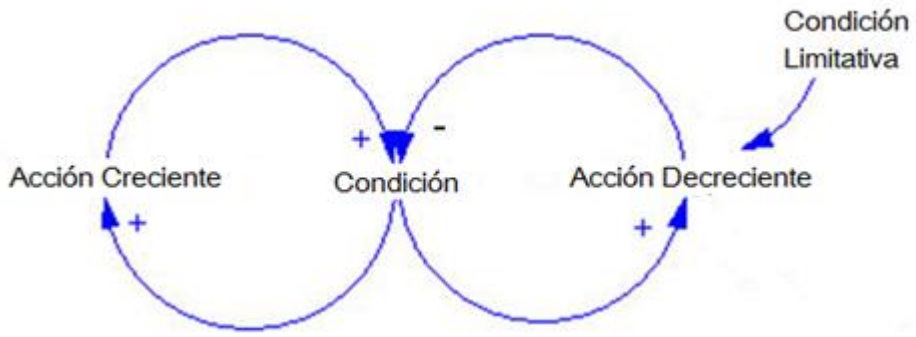


Figura 14.1: Arquetipo Límites de crecimiento.

Desplazamiento de la carga

Se usa una "solución" de corto plazo para corregir un problema, con resultados inmediatos aparentemente positivos. A medida que esta corrección se usa cada vez más, las medidas correctivas fundamentales se aplican cada vez menos. Con el tiempo, las aptitudes para la solución fundamental se atrofian, creando mayor dependencia respecto de la solución del síntoma.

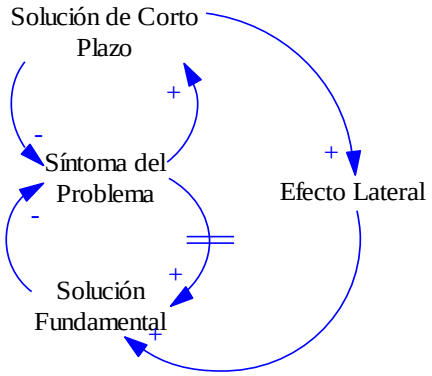


Figura 14.2: Arquetipo Desplazamiento de la carga.

Erosión de metas

En este arquetipo existe una tensión dinámica entre una solución sintomática y una fundamental, donde el conflicto está en el rendimiento que no está cumpliendo con la meta establecida. Por lo que se considera como primera alternativa la solución sintomática, cambiando el objetivo a uno más asequible reduciéndolo para asegurar que siempre se cumpla, creyendo que mediante esta adopción de medidas correctivas se puede resolver el problema de inmediato, en lugar de determinar con rigor la solución fundamental para lograr el desempeño originalmente esperado.

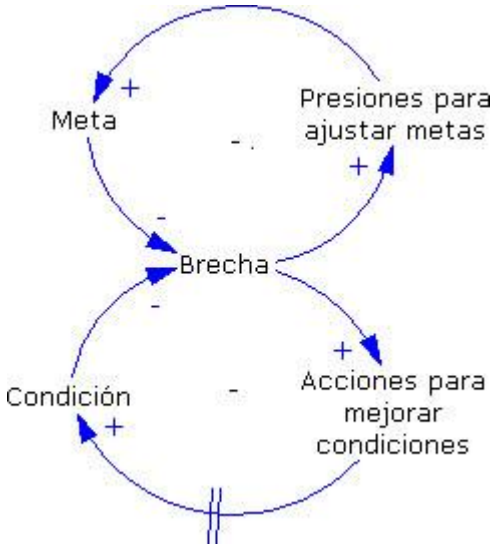


Figura 14.3: Arquetipo Erosión de metas.

Éxito para quien tiene éxito

Dos actividades compiten por recursos limitados. A mayor éxito, mayor respaldo, con lo cual la otra se queda sin recursos.

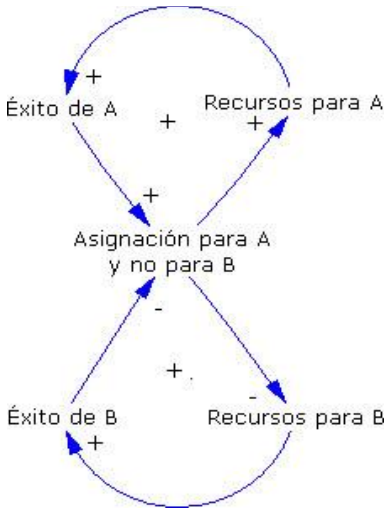


Figura 14.4: Arquetipo Éxito para quien tiene éxito.

Tragedia del terreno común

Los individuos utilizan un recurso común pero limitado reparando únicamente en las necesidades individuales. Al principio son recompensados, pero eventualmente hay una disminución en las ganancias, lo cual les induce a intensificar los esfuerzos. Al final agotan o erosionan el recurso.

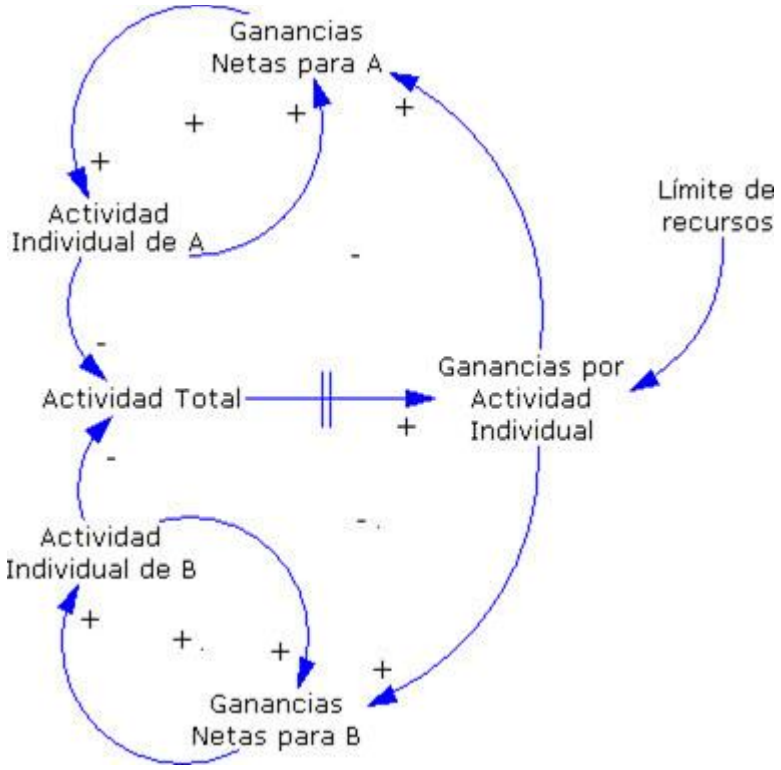


Figura 14.5: Arquetipo Tragedia del terreno común.

Escalada

Dos personas u organizaciones entienden que su bienestar depende de una ventaja relativa de una sobre la otra. Cuando una se adelanta, la otra se siente amenazada y actúa con mayor agresividad para recobrar su ventaja, los cual amenaza a la primera, aumentando su agresividad, y así sucesivamente. A menudo cada parte ve su conducta agresiva como una reacción defensiva ante la agresión de la otra; pero la "defensa" de cada parte deriva de una escalada que escapa a la voluntad de ambas.

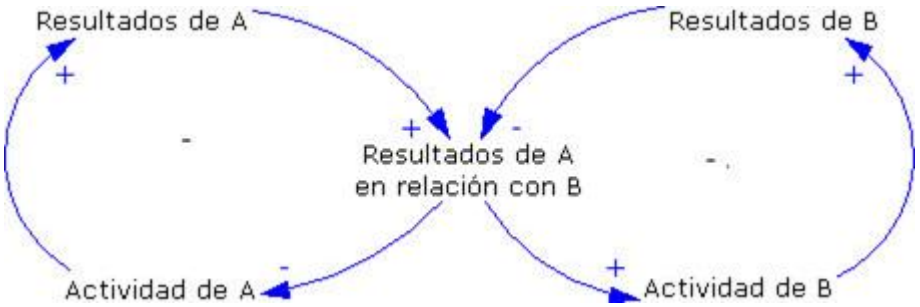


Figura 14.6: Arquetipo Escalada.