



**Evaluación de Impacto *ex ante* de Proyectos  
de Investigación  
Caso: Proyectos Financiados por Colciencias  
en Malaria en el Programa de Ciencia y  
Tecnología de la Salud**

Sonia Esperanza Monroy Varela

28 de agosto de 2017



**EVALUACIÓN DE IMPACTO *EX ANTE* DE PROYECTOS  
DE INVESTIGACIÓN  
CASO: PROYECTOS FINANCIADOS POR COLCIENCIAS  
EN MALARIA EN EL PROGRAMA DE CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA DE LA SALUD**

**SONIA ESPERANZA MONROY VARELA**

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de  
**Doctor en Ingeniería — Industria y Organizaciones**

Director:  
Hernando Díaz Morales  
Ph. D.

Línea de Investigación:  
Métodos y Modelos de Optimización y Estadística

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
BOGOTÁ  
2017



Aprobada por la Facultad de Ingeniería,  
en cumplimiento de los requisitos exigidos  
para otorgar el título de:

**Doctor en Ingeniería — Industria y  
Organizaciones**

---

Hernando Díaz Morales  
Director de la Tesis

---

Adriana Roa Celis-Atkinson, PhD  
Leeds University Business School, Jurado

---

Fernando Pío De La Hoz Restrepo, PhD, MD  
Universidad Nacional de Colombia, Jurado

---

Carlos Eduardo Moreno Mantilla, PhD  
Universidad Nacional de Colombia, Jurado

Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá, 18 de agosto de 2017

*“Vive como si fueras a morir mañana. Aprende como si fueras a vivir para siempre”.*

Mahatma Gandhi

Dedico esta tesis a mi esposo Alejandro, a mis hijos Camila y Nicolás, a la memoria de mi padre Jaime, a mi madre Esperanza y a todos aquellos que me apoyaron incondicionalmente.

# Resumen

¿Cómo medir el impacto de la inversión en proyectos de investigación y desarrollo? y ¿Cómo podemos evaluar, en forma *ex ante*, los efectos de una política pública de financiamiento a la investigación? Este problema tiene gran importancia para los formuladores de políticas públicas y para los tomadores de decisiones que quieren basar sus decisiones en evidencias sólidas. El tema se ha tratado habitualmente con la evaluación por proyecto pero rara vez se han estudiado los efectos de las políticas públicas sobre la investigación de forma integrada y teniendo en cuenta la naturaleza del proceso de generación de conocimiento.

En este orden de ideas, se propone un análisis basado en series de tiempo que considera que el proceso de generación de conocimiento es acumulativo y caracterizado por efectos de largo plazo, resultantes de la financiación de proyectos de investigación. También, se diseña un modelo basado en agentes que permite establecer las relaciones dinámicas entre los investigadores y los grupos de investigación en el desarrollo de una investigación y sus efectos sobre la producción académica y científica. Adicionalmente, se desarrolla el estudio de caso de los proyectos financiados por Colciencias en malaria en Colombia, con el fin de validar los modelos de evaluación de impacto *ex ante* desarrollados.

En esta tesis se presentan varios ejemplos para ilustrar los métodos descritos y se realizan diversas simulaciones que evidencian que las políticas de financiamiento sí tienen impactos duraderos sobre la producción científica y que demuestran que el proceso de investigación se puede modelar a través de un proceso estocástico. También se pudo comprobar la existencia de un cambio estructural en el sistema de investigación en Colombia, a partir del año 2012, lo cual coincide con la implementación del Sistema General de Regalías.

Se espera que las aproximaciones metodológicas aquí presentadas lleguen a ser una herramienta básica para la evaluación de políticas públicas y para la evaluación de impacto *ex ante* de la financiación de la investigación.

## Palabras clave

Evaluación de impacto; evaluación *ex ante*; investigación y desarrollo - I+D; modelos de series de tiempo; modelos basados en agentes; microsimulación.



# Abstract

How do we measure the impact of investment on research and development projects? And how can we assess the effects of a public research funding policy ? This problem is of great importance to policymakers and decision makers who want to base their decisions on sound evidence. The subject has usually been dealt with through the evaluation of individual projects, but the effects of public policies on research have rarely been studied in an integrated manner, taking into account the nature of the knowledge generation process.

In this order of ideas, we propose a time series analysis methodology that takes into account that the process of knowledge generation is a cumulative one and characterized by long term effects resulting from investments in research projects. In addition, an agent-based model is designed with the purpose of establishing the dynamic relationships between the different participants in the research process and its effects on academic and scientific production. Moreover, to illustrate and validate the use of the impact assessment methodologies being proposed, a case study of the Colciencias-funded projects in Malaria was conducted.

In this thesis several examples are presented to illustrate the methods described and several simulations are performed that support the idea that research funding policies do have long lasting impacts on scientific production. They also show that the research process can be adequately modeled through a stochastic process. In addition, the existence of a structural change in the structure of the National Research System was demonstrated, starting in 2012, a moment that coincides with the implementation of the General Royalty System.

It is the author's hope that the methodological approaches presented here could become part of the basic toolbox for public policy evaluation and for the *ex ante* evaluation of the impact of research funding.

## Keywords

Impact evaluation or assessment; *ex ante* evaluation; research and development; time series models; agent-based models; microsimulation.



# Contenido

Resumen	v
Abstract	vii
Lista de tablas	xiii
Lista de figuras	xvii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Investigación y desarrollo</b>	<b>7</b>
2.1 Contexto . . . . .	7
2.2 Construcción de capacidades . . . . .	9
2.3 Tipos y niveles de evaluación . . . . .	11
2.3.1 El concepto de impacto . . . . .	13
2.3.2 Impactos de proyectos de investigación . . . . .	14
<b>3 Impacto de la investigación</b>	<b>17</b>
3.1 Antecedentes . . . . .	17
3.2 El problema de evaluación de impacto . . . . .	18
3.2.1 Problema de atribución o inferencia causal . . . . .	21
3.2.2 Contrafactuales . . . . .	21
3.2.3 Sesgo de la selección . . . . .	22
3.3 Evaluación de impacto de proyectos de investigación . . . . .	24
3.4 Experiencia reciente de evaluación en Colombia . . . . .	26
<b>4 Evaluación de impacto <i>ex ante</i></b>	<b>29</b>
4.1 Métodos econométricos de comportamiento . . . . .	29
4.2 Métodos de simulación . . . . .	31
4.2.1 Microsimulación . . . . .	31
4.2.2 Modelos basados en agentes . . . . .	34
4.2.3 Modelos basados en opciones financieras . . . . .	35
4.2.4 Modelos macro económicos . . . . .	36
4.2.5 Evaluación <i>ex ante</i> de programas de investigación . . . . .	38

4.3	Comparación de metodologías . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Análisis basado en series de tiempo</b>	<b>49</b>
5.1	Preprocesamiento de los datos . . . . .	51
5.2	Postprocesamiento de los datos . . . . .	51
5.3	Estadística descriptiva de series de tiempo . . . . .	52
5.4	Análisis de intervención . . . . .	56
5.5	Cambios estructurales . . . . .	59
5.6	Modelos ADL (Autorregresivo con Retardo Distribuido) . . . . .	62
5.7	VAR (Modelos Auto-Regresivos Vectoriales) . . . . .	63
5.8	Cointegración . . . . .	65
5.9	Pronósticos . . . . .	68
5.10	Procedimiento para utilizar análisis de series de tiempo . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Modelo basado en agentes</b>	<b>71</b>
6.1	Modelo conceptual . . . . .	71
6.1.1	Objetivos del modelo . . . . .	71
6.1.2	Metodología . . . . .	72
6.1.3	Participantes y procesos . . . . .	74
6.2	Implementación . . . . .	78
6.2.1	Datos . . . . .	79
6.2.2	Agentes y población sintética . . . . .	80
6.2.3	Investigadores . . . . .	81
6.2.4	Grupos de Investigación . . . . .	87
6.3	Resultados y análisis de sensibilidad . . . . .	89
6.3.1	Dinámica de la investigación . . . . .	91
6.3.2	Análisis de sensibilidad . . . . .	92
6.4	Análisis de la robustez . . . . .	93
6.4.1	Remuestreo . . . . .	93
6.4.2	Bootstrap . . . . .	94
<b>7</b>	<b>Estudio de Caso</b>	<b>101</b>
7.1	Protocolo del estudio de caso . . . . .	103
7.1.1	Objetivos del estudio de caso . . . . .	103
7.1.2	Unidad de análisis . . . . .	103
7.1.3	Proposiciones . . . . .	104
7.1.4	Datos . . . . .	104
7.1.5	Estrategia analítica e interpretación de los datos . . . . .	108
7.2	Resultados del análisis basado en series de tiempo . . . . .	109
7.2.1	Descripción de las series de tiempo . . . . .	109
7.2.2	Análisis de intervención . . . . .	112
7.2.3	Evaluación de los efectos de financiación de investigaciones . . . . .	113
7.2.4	Modelo Auto Regresivo Vectorial (VAR) . . . . .	114

7.3	Resultados del modelo basado en agentes . . . . .	116
7.3.1	Efectos de la política de financiación . . . . .	117
7.3.2	Efectos de las coautorías . . . . .	118
7.3.3	Efectos de la colaboración entre grupos . . . . .	119
7.3.4	Externalidades – Financiación internacional . . . . .	120
7.3.5	Variación simultánea de parámetros . . . . .	120
7.3.6	Análisis por superficie de respuesta . . . . .	124
7.4	Entrevistas a integrantes de la comunidad científica . . . . .	127
<b>8</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>131</b>
8.1	Conclusiones . . . . .	131
8.2	Recomendaciones . . . . .	134
	<b>Apéndice A Ecuaciones de diferencias</b>	<b>137</b>
	<b>Apéndice B Series de tiempo o series temporales</b>	<b>139</b>
B.1	Preparación de datos . . . . .	139
B.1.1	Eliminación de tendencia . . . . .	140
B.1.2	Diferenciación y variables integradas . . . . .	140
B.2	Pruebas de hipótesis para raíces unitarias . . . . .	141
B.2.1	Prueba de Dickey-Fuller aumentada . . . . .	141
B.2.2	Otras pruebas de raíces unitarias . . . . .	142
	<b>Anexo: Guía de entrevista abierta</b>	<b>143</b>
	<b>Anexo: Productos de la tesis</b>	<b>145</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>146</b>



# Lista de tablas

4.1	Comparación de metodologías de evaluación <i>ex ante</i> . . . . .	48
5.1	Matriz de correlación del número de publicaciones en varias áreas y la inversión en I+D. . . . .	68
6.1	Categorías de grupos de investigación, según tamaño. . . . .	88
7.1	Resultados de las simulaciones en un diseño factorial, variando cinco parámetros. . . . .	122



# Lista de figuras

3.1	Resultados de la investigación acumulados por período. . . . .	27
5.1	Series de tiempo del número de artículos publicados en revistas incluidas en Scopus por autores colombianos en medicina(Fuente: Scopus) y de gastos nacionales en I+D. Fuente: (Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, 2015). . . . .	53
5.2	Logaritmo del número de papers publicados en varios países (Fuente: Scopus). . . . .	54
5.3	Función de autocorrelación del número de artículos Scopus publicados por autores colombianos (a) y franceses (b) (Fuente: Scopus). La banda gris representa un intervalo de confianza del 95 %. . . . .	55
5.4	Autocorrelaciones de publicaciones de diferentes países (Fuente: Scopus database). . . . .	56
5.5	Función de correlación cruzada del número de artículos en Scopus publicados por autores del Reino Unido y autores de (a) Estados Unidos y (b) China) (Fuente: Scopus database). . . . .	57
5.6	Valores recursivos de la estadística $F$ para cambios estructurales en el número de artículos en medicina, por autores colombianos (Fuente: Scopus). . . . .	61
5.7	Función de Respuesta al Impulso (IRF) del número de artículos publicados por autores de cuatro países (DE, FR, UK, US). Cada fila muestra el efecto sobre todos los países de un impulso en uno de los países (el que empieza en 1). . . . .	65
5.8	Evolución del número de artículos para cuatro áreas de investigación y de la inversión nacional en I+D. . . . .	67
5.9	Pronóstico de publicaciones de autores colombianos. . . . .	69
6.1	Metodología CAP. Adaptado de (Smajgl and Barreteau, 2014), pág. 4. . . . .	72
6.2	Modelo conceptual del sistema. . . . .	78
6.3	Contribuciones relativas de las categorías de grupos de investigación al total. Se muestran los porcentajes acumulados de artículos publicados durante el período 2003-2013, el número de integrantes y el número de grupos . . . . .	80
6.4	Evolución del número de nuevos investigadores por año. . . . .	82
6.5	Distribución de probabilidad de los tiempos de permanencia en un grupo. . . . .	83

6.6	Probabilidad condicional acumulada del número de productos en un mes cuando hay producción. . . . .	85
6.7	Distribución del número de autores de los artículos. . . . .	86
6.8	Representación de los grupos e investigadores en el modelo ABM. . . . .	90
6.9	Interfaz gráfica del modelo ABM. . . . .	91
6.10	Respuesta dinámica de la productividad. . . . .	92
6.11	Ilustración del concepto de remuestreo. . . . .	93
6.12	Histograma de frecuencias y gráfica de ajuste a una distribución normal ( <i>qq-plot</i> ). . . . .	97
6.13	Producción mensual vs. porcentaje de proyectos financiados. . . . .	98
6.14	Diagrama de flujo del proceso para asignación del número de coautores. . . . .	99
7.1	Casos de malaria en Colombia. . . . .	102
7.2	Distribución de los grupos de investigación por regiones. . . . .	105
7.3	Distribución de los grupos de investigación por áreas de conocimiento. . . . .	106
7.4	Distribución de los grupos de investigación por categoría, según clasificación de Colciencias. . . . .	106
7.5	Relación entre número de integrantes y categoría según modelo de medición. . . . .	107
7.6	Número de investigadores activos por nivel de formación. . . . .	108
7.7	Series de tiempo de la investigación en malaria en Colombia. . . . .	109
7.8	Descripción de las series de tiempo de artículos publicados en el área de malaria. . . . .	110
7.9	Correlación Cruzada de dinero invertido en financiación y número de artículos. . . . .	111
7.10	Series de tiempo de publicaciones en el área de malaria y casos reportados. . . . .	111
7.11	Pronóstico de la producción bajo diferentes escenarios de inversión. . . . .	115
7.12	Función de Respuesta al Impulso de $p_t$ y $g_t$ , obtenida a partir del modelo 7.5. . . . .	116
7.13	Producción mensual vs financiación nacional. . . . .	117
7.14	Productividad global vs financiación nacional. . . . .	118
7.15	Productividad global de autores y coautores vs financiación nacional. . . . .	119
7.16	Producción mensual vs. número promedio de coautores. . . . .	120
7.17	Efecto de la tasa de colaboración entre grupos. . . . .	121
7.18	Productividad promedio de grupos cuando existe acceso a financiación internacional. . . . .	123
7.19	Productividad promedio de grupos con acceso a financiación internacional. . . . .	123
7.20	Productividad promedio de grupos sin acceso a financiación. . . . .	124
7.21	Efectos principales sobre la productividad global. . . . .	124
7.22	Efectos principales sobre la producción mensual. . . . .	125
7.23	Curvas de nivel de la superficie de respuesta de la producción total del conjunto de investigadores. (a): en función de las tasas de participación de autores de otros grupos e internacionales (b): en función del número promedio de coautores de un producto y la fracción de proyectos financiados. . . . .	127

7.24	Curvas de nivel de la superficie de respuesta de la productividad promedio de los grupos. (a): en función del número promedio de coautores de un producto y la fracción de proyectos financiados. (b): en función de las tasas de participación de autores de otros grupos e internacionales. . . . .	128
B.1	Substracción de la tendencia de una serie. . . . .	140
B.2	Diferenciación de la serie de la figura B.1(a). . . . .	141



# Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento al Director de la tesis, profesor Hernando Díaz Morales, quien me orientó y apoyó en el desarrollo de este proyecto de investigación. Su confianza en mi trabajo y su capacidad para hacer acompañamiento y supervisión de mis ideas han sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigadora.

Un especial reconocimiento merece el profesor Carlos Alfonso Cortés Amador, ya fallecido, quien al inicio de este trabajo fue el Director de la tesis. Sus consejos paternalistas, humor y entusiasmo fueron fundamentales para continuar esta dura labor.

También quiero agradecer a los estudiantes del programa de ingeniería industrial Jelitza Steele Parada, Juan Sebastián Numpaqué Cano e Iván Andrés Quintero Quintero, quienes como integrantes del semillero de investigación del grupo Complexus, aportaron sus conocimientos e ideas en el diseño e implementación del modelo basado en agentes. De manera especial, expreso mi gratitud a Camila Jaramillo por su invaluable ayuda en la revisión de estilo; esta tesis mejoró bastante con sus sugerencias.

Adicionalmente, quiero agradecer al médico y científico Sócrates Herrera Valencia, director del Centro de Investigaciones Científicas Caucaseco, por su apreciable espíritu de colaboración, su enriquecedora entrevista y sus valiosos aportes; al Ingeniero Químico Jorge Alonso Cano Restrepo, director del Centro Internacional de Entrenamiento e Investigaciones Médicas - CIDEIM, por darme a conocer sus apreciaciones y su visión de futuro de la financiación de la investigación en Colombia; y al Economista Matteo Grazzi, especialista en competitividad e innovación del Banco Interamericano de Desarrollo por sus útiles consejos y aportes.

Finalmente, quiero dar las gracias a Colciencias por su colaboración en el suministro de los datos, y espero que los resultados de esta investigación sean de utilidad para la institución y especialmente para los estudios de evaluación de impacto de programas de financiamiento de la ciencia y la tecnología.



# Capítulo 1

## Introducción

En la sociedad actual, la ciencia y la tecnología tienen un papel fundamental para el crecimiento y desarrollo de las naciones. Sin embargo, la creación o la sola aplicación del conocimiento precisa la existencia de capacidades científicas y tecnológicas, lo cual no es tarea fácil. Se requiere contar con talento humano, formado a alto nivel (maestrías y doctorados), con infraestructura de laboratorios y, por supuesto, con la financiación sostenida para el desarrollo de programas y proyectos de investigación e innovación. Es por eso que muchos países han adoptado una estrategia de inversión en programas de investigación como parte básica de su política pública. No obstante, en muchos de ellos, aun en los más desarrollados, se han dado controversias sobre la conveniencia de destinar fondos públicos para financiar la investigación, en lugar de destinarlos a otro tipo de programas con retornos aparentemente mayores en el corto plazo.

En este contexto adquiere gran importancia el diseño de políticas públicas basadas en la evidencia, por lo cual se hace necesario evaluar los efectos de los programas de intervención del Estado, con el fin de demostrar su rentabilidad financiera y social y usar sus resultados para tomar decisiones acerca de la política pública. Con este propósito, se genera la llamada **evaluación de impacto**, con la cual se busca valorar los efectos, tanto positivos como negativos, atribuidos a la política que está siendo evaluada.

El proceso de creación de conocimiento debe ser considerado como un proceso dinámico, estocástico, acumulativo y, generalmente, de largo plazo. En efecto, la generación de conocimiento nuevo se da como resultado de procesos de acumulación de experiencias y conocimientos anteriores a través de la investigación. Normalmente, ni el resultado ni el momento en que se produce son predecibles. Por lo tanto, las metodologías orientadas a la evaluación de su impacto deben considerar estas características. Esta investigación buscaba diseñar modelos de evaluación del impacto de programas de investigación, teniendo en cuenta la naturaleza del proceso de creación de conocimiento.

El problema de evaluación de impacto de la financiación de programas de investigación consiste, entonces, en valorar sus diferentes efectos, económicos, académicos, sociales, culturales, etc. Este tipo de evaluación involucra relaciones causa-efecto, especialmente en lo que se conoce como **problema de atribución**, en el cual se trata de determinar cuáles efectos se pueden atribuir, directamente, al programa que se está evaluando.

Las técnicas tradicionales para hacer evaluación de impacto han sido desarrolladas para valorar los efectos de programas sociales en los cuales existen resultados que son directamente atribuibles al programa y que no tienen las características dinámicas del proceso de investigación ya mencionadas. En los programas sociales generalmente se evalúan resultados a corto plazo y que, normalmente, son independientes de la forma cómo se llegó a la condición actual. No obstante, la mayoría de las metodologías actuales evalúan los impactos de forma *ex post*, es decir, cuando el programa de intervención ya ha sido desarrollado y sus efectos medidos. Esto permite analizar, evaluar, ajustar, reorientar o, incluso cancelar programas subsiguientes. Es importante tener en cuenta que los métodos no están diseñados para predecir, de ninguna manera, posibles efectos futuros de nuevos programas.

Las técnicas usuales de evaluación de impacto, derivadas de diseños experimentales o cuasi-experimentales para comparar grupos *de tratamiento* y *de control* con el fin de examinar el efecto de las políticas o intervenciones, seleccionan los integrantes de cada uno de los dos grupos en forma aleatoria. Por razones éticas, estos diseños aleatorizados no son aplicables en el caso de proyectos de investigación puesto que la selección de los proyectos en una convocatoria no puede hacerse en forma aleatoria, independiente de su calidad. La metodología más usada, cuando un diseño aleatorizado no es posible, es la de diferencias en diferencias, la cual tampoco puede ser empleada en la evaluación de la financiación de la investigación, puesto que sus supuestos básicos no pueden satisfacerse en ese caso. Por ejemplo, no suele existir una línea de base inicial y no suele haber proyectos o grupos de investigación comparables, entre los financiados y los no financiados.

Surge entonces la necesidad de evaluar los efectos probables de un programa social antes de su ejecución, con el fin de hacer un diseño de política que tenga en cuenta los posibles resultados a fin de seleccionar las opciones que producen los resultados más favorables para la sociedad que hace las inversiones. Estas metodologías se denominan de **evaluación de impacto *ex ante***.

Para disponer de una metodología que permitiera hacer la evaluación *ex ante* de la financiación de la investigación, emprendimos esta tesis, cuyo objetivo general es diseñar un modelo de evaluación de impacto *ex ante*, de proyectos de investigación, tomando como estudio de caso la financiación otorgada por Colciencias en el área de malaria en el Programa de Ciencia y Tecnología de la Salud.

Como objetivos específicos de la investigación se establecieron los siguientes:

1. Analizar y comparar metodologías de evaluación *ex ante* para medir el impacto de proyectos de I+D.
2. Diseñar e implementar un modelo de evaluación *ex ante* para la medición del impacto de proyectos de investigación.
3. Calibrar el modelo de evaluación *ex ante* mediante evaluaciones *ex post*.
4. Desarrollar el estudio de caso de la financiación de proyectos de I+D en Malaria financiados en el Programa de Ciencia y Tecnología de la Salud de Colciencias.

5. Analizar la robustez de la evaluación de impacto con respecto a las incertidumbres inherentes al proceso.

La política pública debería basarse en información global y no estar fundamentada en unos pocos casos particulares. Por lo tanto, requiere que el análisis se base en información macroeconómica. En consecuencia, la evaluación de impacto debe analizar los volúmenes de producción científica y sus efectos sobre el total de la población, lo cual quiere decir que los métodos de evaluación de impacto de la política pública, especialmente en el caso de la de financiación de la investigación, no están diseñados para la valoración de proyectos individuales sino para conjuntos de proyectos, entendidos como un programa de investigación cuyos impactos se consideran a nivel agregado.

En el desarrollo de esta investigación se diseñaron dos modelos completamente diferentes para hacer la evaluación de impacto *ex ante* de proyectos de investigación. En primer lugar, se desarrolló un modelo basado en análisis de series de tiempo, mediante el cual es posible determinar los efectos de diferentes variables exógenas que incluyen, por supuesto la financiación, sobre un conjunto de variables de resultado entre las cuales podría estar la producción científica. En segundo lugar, se desarrolló un modelo basado en agentes o individuos, el cual permite simular los procesos detallados de la producción científica y las interacciones de unos investigadores con otros y con los grupos de investigación. Estos modelos son independientes, pero pueden ser complementarios, en la medida en que permiten analizar los efectos de diferentes factores sobre los resultados de las investigaciones.

El modelo que utiliza análisis de series de tiempo, está basado en las técnicas básicas utilizadas en econometría para estudiar las relaciones entre diferentes componentes de la economía. No había sido utilizado anteriormente<sup>1</sup>, para evaluación de impacto de programas de investigación. Para su aplicación se requiere contar con la información histórica detallada de diferentes variables, tanto endógenas como exógenas, para poder construir los modelos requeridos. Es posible incluir diversos tipos de impactos, siempre y cuando su evolución histórica haya sido registrada. Las herramientas descritas en este documento, además de permitir un diagnóstico basado en estadísticas descriptivas, también posibilitan hacer análisis de intervención, identificar cambios estructurales y pronosticar los resultados, *ex ante*. La metodología para aplicar esta técnica es relativamente estándar y se presenta en el capítulo 5.

El modelo basado en agentes diseñado permite simular los procesos de creación de conocimiento y los comportamientos dinámicos de los investigadores y su relación con los grupos de investigación. Es posible simular comportamientos adaptativos, complejos, que generen aprendizajes que puedan resultar en dinámicas emergentes. Para diseñar el modelo se siguió una metodología de tipo inductivo, denominada CAP (Caracterización y Parametrización) por sus iniciales en inglés, en la cual modelamos las componentes individuales e identificamos los patrones de comportamiento que siguen estas componentes en sus interacciones. A partir de estos patrones creamos el conjunto de reglas que permita reproducir dichos patrones en el modelo. En primer lugar, establecimos los actores del sistema de investigación que son, básicamente, investigadores y grupos de investigación,

---

<sup>1</sup>De acuerdo con la revisión de literatura que se llevó a cabo para nuestro trabajo.

los cuales fueron representados por dos clases de agentes en el modelo. A continuación se identifican los procesos que caracterizan la actividad de los investigadores y los grupos. Seguidamente, seleccionamos modelos matemáticos o probabilísticos que describen estos procesos. Por ejemplo, los tiempos de permanencia de un investigador en un grupo, la probabilidad de que un investigador produzca un artículo en un mes determinado o el número de coautores de un artículo, han sido aproximados por modelos de distribuciones de probabilidad, obtenidos a partir de los datos históricos de la investigación en el área de malaria. También se seleccionó la composición y el tamaño de los grupos en el modelo con el fin de representar lo más fielmente posible las características actuales y recientes de los grupos realmente existentes.

A partir de los atributos individuales y colectivos de los investigadores y los grupos de investigación, se generó un conjunto de reglas que caracterizan la dinámica global. Con base en estas reglas se diseñó el modelo basado en agentes, con el fin de representar las diversas interacciones posibles y permitir la simulación de diferentes condiciones, parametrizadas por valores ajustables en el modelo.

Los dos modelos desarrollados fueron aplicados y validados en un estudio de caso acerca de la financiación de la investigación en malaria en Colombia. Mediante este estudio fue posible caracterizar la dinámica de los grupos del área, identificar relaciones causa-efecto y analizar el efecto de varios parámetros sobre los patrones de comportamiento individuales y grupales.

Los modelos de series de tiempo diseñados permiten evidenciar que las políticas de financiamiento a la investigación sí tienen un impacto duradero sobre la producción académica y científica en el área de malaria y se pudo cuantificar ese impacto. Esos impactos se ven claramente tanto cuando se decide invertir en investigación como cuando se reduce dicha financiación. También se pudo comprobar la existencia de un cambio estructural en el sistema de investigación en Colombia, a partir del año 2012, coincidiendo con la implementación del Sistema General de Regalías. A partir de ese momento, se observó una notable disminución en la participación de estudiantes doctorales, a través de los grupos de investigación. En el caso del área de malaria los efectos han sido muy pronunciados y se han reflejado en un estancamiento del número de investigadores y en una disminución del ritmo de crecimiento de las publicaciones especializadas.

Con base en los modelos de componentes individuales, se desarrolló un modelo basado en agentes, cuya respuesta replica adecuadamente la dinámica de la investigación en el área de malaria en Colombia. Estas dinámicas se expresan tanto en la producción científica y tecnológica como en la interacción entre investigadores y de éstos con los grupos de investigación. Este modelo permite analizar la influencia de diversos factores, que constituyen la política de fomento a la investigación, sobre el crecimiento y la composición del sistema de investigación. Los resultados muestran, por ejemplo, cómo algunas características de las convocatorias de proyectos pueden afectar tanto la productividad como la inequidad, entre los grupos. También se ha podido analizar la importancia relativa de las diferentes características sobre la producción y la productividad per cápita.

Por otro lado, se implementó una técnica para analizar la robustez de la estimación de los parámetros y de los resultados de los modelos. Para ello se diseñó un procedimiento,

basado en la técnica de remuestreo *bootstrap*, la cual, junto con la replicación de las simulaciones, permite obtener estimaciones robustas de los intervalos de confianza de los resultados del modelo.

Con el fin de guiar al lector, los capítulos 2, 3 y 4 presentan el contexto y el marco teórico de la investigación. En el capítulo 5 se desarrolla el modelo basado en análisis de series de tiempo, junto con una breve fundamentación teórica. El capítulo 6 presenta el diseño e implementación del modelo basado en agentes y se presenta la técnica para analizar la robustez. Estos modelos se aplican en el estudio de caso de malaria en Colombia y sus resultados se presentan en el capítulo 7. Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones, en el capítulo 8.



# Capítulo 2

## Investigación y desarrollo

### 2.1 Contexto

La ciencia y la tecnología se ha considerado por años un factor de desarrollo económico y social que permite lograr una mejor calidad de vida y por ende un mayor bienestar para la sociedad. En este marco se ha considerado que el propósito de la ciencia es producir conocimiento generalizable que resulta usualmente del desarrollo de la investigación básica y que generalmente se publica a través de artículos científicos, mientras que el propósito de la tecnología es aplicar conocimiento (investigación aplicada y desarrollo experimental) para generar productos, diseñar procesos e implementar servicios.

Según Sagasti y Garcia ([Sagasti and García, 2010](#)) es posible distinguir tres componentes en un marco conceptual integrativo del proceso de generación, transmisión y utilización del conocimiento: a) La evolución de las formas de generar conocimiento, que permite comprender los fenómenos naturales y sociales; b) Los avances tecnológicos, que proveen respuestas organizadas para afrontar los desafíos que plantea el entorno biofísico y social, y c) La transformación y expansión de las actividades productivas, que proveen bienes y servicios para satisfacer las necesidades de la comunidad. Por lo tanto, una sociedad se puede caracterizar por la forma en que adopta el despliegue de cada uno de estos tres componentes, por la manera en que interactúan y se articulan a través de los procesos de innovación y por la naturaleza de las influencias recíprocas y el entorno institucional, social, cultural y político en que se ubican.

De otra parte, el rasgo central de las sociedades del conocimiento es el diseño de procesos continuos de generación y uso del conocimiento, organizados de tal forma que puedan contribuir a procesos de aprendizaje social. Se trata de sociedades con capacidad para generar conocimiento sobre su realidad y su entorno para utilizarlo en el proceso de concebir, forjar y construir su futuro ([Colciencias, 1998](#)).

Hoy en día la clasificación de los factores de producción ampliamente conocidos: la tierra, el trabajo y el capital, ha evolucionado, y actualmente el conocimiento se considera un factor fundamental de valor agregado para el logro de ventajas competitivas y por tanto un factor de crecimiento económico y social ([Monroy, 2010](#)).

En este contexto, es fundamental reconocer que el proceso de generación de conoci-

miento es diferente al proceso de aplicación y uso del mismo y éste a su vez, es diferente al proceso de apropiación social del conocimiento. Esto implica que indudablemente tanto la evaluación de resultados como la evaluación de impactos de cada proceso exige definir los objetivos de la evaluación, establecer los distintos criterios de medición e identificar los diferentes métodos de evaluación para seleccionar el más adecuado según los requerimientos.

En el proceso de generación de conocimiento, en la literatura se contempla que hay diversas formas de producirlo, una de las más conocidas fue la que introdujo Gibbons (Gibbons et al., 1994), que la denominó modo 2 de producción de conocimiento diferenciándola del modo tradicional o modo 1, el cual funciona dentro de una estructura disciplinar, homogénea y jerárquica. Se trata de una forma de producir conocimiento cuyo complejo de ideas, métodos y valores integra “[...] las normas cognitivas y sociales que deben seguirse en la producción, legitimación y difusión del conocimiento” (Gibbons et al., 1994).

Así, desde esta perspectiva la producción del conocimiento en el modo tradicional está orientada por los intereses de una comunidad científica especializada, cuyo espacio de trabajo se ha institucionalizado, principalmente, dentro de las estructuras de la universidad. Mientras que el modo 2 de generación de conocimiento funciona dentro de una estructura transdisciplinar, heterogénea y se lleva a cabo en un contexto de aplicación, el cual constituye un referente amplio, configurado por un conjunto diverso de demandas intelectuales y sociales. Este nuevo modo de producción del conocimiento parte de la idea de que éste pueda ser útil para un público más amplio, por lo que el modelo tiende a integrar una gama diversa de especialistas que trabajan en equipo, con un eje centrado en la aplicabilidad de sus resultados. Así, este modo de producción de conocimiento se crea a través de un consenso condicionado por las demandas cambiantes que evolucionan con el mismo sistema de producción de conocimiento. En este orden de ideas el resultado final estará más allá de cualquier disciplina particular; de ahí su carácter transdisciplinar.

En el proceso de aplicación y uso del conocimiento se considera, además de la gestión de conocimiento (Nonaka and Takeuchi, 1995) y su aplicación en productos y servicios, la dinámica de la innovación, en la cual a partir de un stock de conocimiento y de diversos mecanismos como el ensayo y error, la práctica, la investigación, entre otros, se crea o mejora un producto o servicio y se genera un proceso de aprendizaje organizacional (Nelson and Winter, 2009).

El proceso de apropiación social del conocimiento se entiende como un proceso que pretende no solamente divulgar el conocimiento sino también internalizarlo. Por lo tanto, incluye el desarrollo de estrategias para ilustrar a la ciudadanía e introducirla en las culturas tecno-científicas. Según Colciencias, 2010 el principal objetivo de la apropiación es que la sociedad se interese en la ciencia, la tecnología y la innovación para que la desarrolle y aplique. En un contexto de democratización y participación, la apropiación es el sustrato de las capacidades que efectivamente generan desarrollo social y económico. Así, la noción de apropiación se mueve en tres niveles: comprender, validar y utilizar.

La evaluación de los procesos de generación, aplicación y uso del conocimiento como de apropiación social del mismo requiere definir qué se quiere evaluar y cuál es su objetivo, con el fin de establecer qué instrumentos y técnicas utilizar y diseñar la metodología

mas adecuada a los requerimientos y restricciones. Por ejemplo, en el caso de programas de investigación, los resultados esperados podrían ser medidos bajo dos enfoques: La medición de la productividad académica y científica por ejemplo, el número de patentes o publicaciones científicas o libros, entre otros. La medición de las capacidades científicas y tecnológicas; por ejemplo, el impacto de la financiación en la formación de talento humano, la generación de redes académicas, la interacción de actores en el sistema de investigación, la capacidad de aprendizaje institucional, entre otros.

Según el Banco Mundial ([Khandker et al., 2010](#)) habitualmente los administradores de los programas se concentran en medir los insumos y los productos inmediatos del programa (cuánto dinero se gasta, cuántos libros de texto se distribuyen), en lugar de valorar si los programas han alcanzado sus objetivos. Hoy en día hay un cambio de enfoque y es pasar de los insumos a los resultados. El enfoque en los resultados permite establecer metas y monitorear las mismas y, de otra parte, hacer rendición de cuentas a la sociedad y apoyar la toma de decisiones de política pública.

La evaluación de impacto de políticas públicas permite evaluar la eficacia y eficiencia de un programa con el fin de reasignar recursos a los programas que cumplan sus objetivos y rediseñar aquellos que no logran los resultados deseados. A su vez, generan conocimiento para la formulación de nuevas políticas y el diseño de nuevos programas sociales, lo que conlleva a incrementar la efectividad del Estado.

## 2.2 Construcción de capacidades

La ciencia, la tecnología y la innovación son elementos fundamentales para el desarrollo de la sociedad de conocimiento, caracterizada por una estructura económica y social en donde el conocimiento ha sustituido al trabajo, a las materias primas y al capital como fuente más importante de la productividad, el crecimiento y las desigualdades sociales ([Drucker, 1994](#)).

En este tipo de sociedades las transformaciones sociales se refieren a cambios en las áreas tecnológicas y económicas, estrechamente relacionadas con las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones — TICs, ([Castells, 2011](#)). También están relacionadas con la forma como estas transformaciones se articulan con la formulación de políticas públicas y con el establecimiento de estrategias para promover la inversión, la formación de talento humano y la apropiación social del conocimiento.

La construcción de capacidades científicas y tecnológicas es, por tanto, un factor de crecimiento económico y desarrollo social. En ese sentido es fundamental generar dinámicas que conlleven al desarrollo de programas y proyectos de investigación científica e innovación tecnológica y al aprendizaje institucional y social, para así aumentar la competitividad de una nación.

En Colombia, en el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación las capacidades científicas y tecnológicas han estado relacionadas directamente con el tema de los recursos humanos, la infraestructura de laboratorios y la financiación de los proyectos de investi-

gación e innovación. Según las cifras de Colciencias<sup>1</sup>, las capacidades se han concentrado principalmente en Bogotá, Medellín y Cali.

Según Jaramillo y Forero ([Jaramillo and Forero, 2001](#)), la evaluación de las capacidades de investigación puede realizarse a través del análisis de las relaciones entre el capital humano, el capital social y el capital intelectual. El capital humano, está definido como el conjunto de competencias humanas que resultan de una inversión voluntaria de tiempo y de recursos, para la formación, aprendizaje y acumulación de conocimiento. El capital social se define como la estructura de relaciones que existe entre los actores; hace referencia a las instituciones que forman parte de una estructura social donde se crean relaciones de jerarquía, confianza y acuerdos sociales; y son recursos para los actores ya que facilitan algunas acciones al interior de la estructura social. Por último, el capital intelectual está definido como la capacidad humana de una organización combinada para la solución de problemas; comprende el conocimiento, las herramientas y las habilidades de los empleados. En el artículo de Jaramillo, 2001, el capital humano está relacionado con el conocimiento individual, el capital intelectual con el conocimiento de las organizaciones, y el capital social con el conocimiento de la sociedad. Sin embargo, hoy en día se considera que el capital humano forma parte del capital intelectual.

Por otra parte, la vicerrectoría de investigación de la Universidad Nacional, 2009, propuso una aproximación a la medición de las capacidades de investigación incluyendo el capital humano, el capital estructural y el capital relacional: el capital estructural, entendido como la infraestructura que incorpora, capacita y sostiene al capital humano; y el capital relacional, integrado por las relaciones con el entorno externo a la organización. ([Universidad Nacional de Colombia. Vicerrectoría de Investigación, 2009](#))

Mas allá de la aplicación de las diferentes metodologías para la medición de las capacidades de investigación, es fundamental considerar ciertos atributos del proceso de generación de conocimiento, tales como:

1. El proceso de generación de conocimiento es un proceso dinámico y acumulativo. Los grupos de investigación que logran generar nuevo conocimiento lo hacen a través del desarrollo de varios proyectos de investigación a través del tiempo.
2. El proceso de desarrollo de la investigación básica, así como la generación de resultados académicos y científicos, y posteriormente la publicación y difusión de los mismos es un proceso de largo plazo. De hecho, hay un espacio temporal entre la creación de conocimiento nuevo y la difusión y apropiación de ese conocimiento.
3. La construcción de capacidades de investigación requiere capital humano formado (a alto nivel: maestría o doctorado), infraestructura (de laboratorios) y financiación para el desarrollo de proyectos de investigación.

Es importante tener en cuenta estos atributos a la hora de seleccionar una metodología de evaluación de impacto de programas de investigación o de sistemas nacionales de ciencia, tecnología e innovación.

---

<sup>1</sup><http://www.colciencias.gov.co/ebook/master/sources/index.htm>

## 2.3 Tipos y niveles de evaluación

Como se mencionó anteriormente, es fundamental definir qué se quiere evaluar y para qué, con el fin de seleccionar la metodología más adecuada. Dependiendo de los criterios que se seleccionen para evaluar, se deben tener en cuenta argumentos técnicos, políticos y presupuestales. Una consideración fundamental es la magnitud del programa en términos de su cobertura y del tiempo que lleva implementado. Si un programa lleva poco tiempo en funcionamiento difícilmente se podrá hacer una evaluación de impacto pero seguramente se podrá hacer una evaluación de resultados en el corto plazo, tan pronto finaliza su ejecución.

Una vez identificado un problema, diseñado e implementado el programa para solucionar dicho problema y de acuerdo con el tiempo de su implementación, se debe efectuar uno de los siguientes tipos de evaluación:

### 1. Evaluación de procesos

Examina la manera como opera el programa, enfocándose en las actividades y recursos del programa con el fin de determinar si genera los productos que debería o si entrega los bienes y/o servicios asociados con la política pública. Según el Consejo Nacional de Evaluación de la política de desarrollo social de México - CONEVAL, la evaluación de procesos brinda información para contribuir a la mejora de la gestión operativa de los programas.<sup>2</sup> Del total de los tipos de evaluaciones, ésta es una de las de mayor utilidad para fortalecer y mejorar la implementación de los programas dado que se detectan las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del marco normativo, estructura y funcionamiento de los programas, aportando elementos para determinar estrategias que incrementen la efectividad operativa y enriquezcan el diseño.

### 2. Evaluación institucional

Comprueba la capacidad institucional del ejecutor del programa con el fin de garantizar la gobernanza, sostenibilidad y efectividad. Grindle ([Grindle, 1997](#)) ofrece un marco conceptual que permite analizar la capacidad institucional en cinco niveles, que van desde el nivel micro hasta el macro: el talento humano de la organización, la organización en si misma, las organizaciones con las cuales se relaciona para funcionar efectivamente, el contexto institucional del sector público, y finalmente, el entorno económico, político y social dentro del cual se desempeña la organización.

### 3. Evaluación de resultados

Estudia los resultados que el programa quiere alcanzar en el corto y mediano plazo y analiza los cambios en las condiciones de los beneficiarios que son producto del programa. Según la Cepal ([Ortegón and Prieto, 2005](#)), es importante establecer claramente desde el principio de un programa o intervención, cuáles son los objetivos

---

<sup>2</sup>[http://www.coneval.org.mx/Evaluacion/MDE/Paginas/Evaluacion\\_Procesos.aspx](http://www.coneval.org.mx/Evaluacion/MDE/Paginas/Evaluacion_Procesos.aspx) consultado el 9 de enero de 2017

y resultados esperados, e identificar qué cambios específicos se esperan y para qué población en particular.

#### 4. Evaluación de impacto

Según Bernal y Peña ([Bernal and Peña, 2011](#)) consiste en la medición del impacto del programa sobre un conjunto de variables de resultado, sobre las cuales se espera que el programa tenga un efecto, en un conjunto de individuos. Este tipo de evaluación generalmente involucra el problema de atribución, esto es la relación causal entre el resultado y el programa, de forma tal que mide la efectividad directamente atribuible a la intervención.

#### 5. Evaluación costo - beneficio

El análisis de costo-beneficio - ACB es una técnica de la teoría de la decisión. Pretende determinar la conveniencia de un programa mediante la valoración en términos monetarios de todos los costes y beneficios derivados directa e indirectamente de dicho programa. Según la Cepal ([Leal, 2005](#)), se evalúa si, en un momento determinado en el tiempo, el costo de una medida específica es mayor que los beneficios derivados de la misma. El ACB permite estimar cuál opción de política es más adecuada en términos económicos.

Es de anotar que en materia de investigación hay un tiempo considerable entre el desarrollo de la investigación para generar nuevo conocimiento y la publicación de resultados o difusión del impacto de ese conocimiento. Este factor claramente diferencia la evaluación de resultados de la evaluación de impacto de un programa específico.

De otra parte, las metodologías de evaluación de políticas públicas a través de la implementación de programas se pueden clasificar, según el momento de ejecución de la política pública, en dos grupos ([Vasco, 2012](#)):

##### 1. Métodos para evaluación *ex ante*

La evaluación *ex ante* se realiza antes de poner en funcionamiento el programa o poner en práctica la política pública y se utiliza de insumo para la toma de decisiones cuando compiten varias alternativas de intervención pública, lo que le permite al formulador o diseñador del programa elegir la opción más conveniente. Su propósito es determinar la viabilidad, pertinencia y sostenibilidad de una política pública antes de tomar la decisión de implementar el programa y conceder la financiación respectiva.

##### 2. Métodos para evaluación *ex post*

La evaluación *ex post* se realiza después de concluida la implementación del programa. Su propósito es identificar los factores de éxito o fracaso y evaluar la efectividad de los resultados para el rediseño del programa o para el diseño de nuevos programas.

Adicionalmente, la evaluación se puede realizar a diferentes niveles: nivel macro, nivel meso y nivel micro. Para el caso de evaluación de programas de investigación el nivel micro

hace referencia, por ejemplo, a la formulación y ejecución de proyectos y a la generación de productos académicos; el nivel meso a los grupos de investigación que los desarrollan y a las instituciones a las cuales pertenecen creando capacidades científicas y promoviendo el aprendizaje organizacional; y el nivel macro hace referencia al entorno, por ejemplo, creación de redes, interacción con otros actores, relación con los planes de desarrollo regional y con la productividad y competitividad. En este sentido una cosa es evaluar el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología, entendido como una organización social conformada por un conjunto articulado de actores que desarrollan roles específicos y que a través de su interacción pueden alcanzar objetivos consistentes con los intereses superiores de la sociedad (Monroy, 2004). Otra cosa es evaluar un Programa Nacional en un área de conocimiento específica, entendida como un ámbito de preocupaciones científicas y tecnológicas estructurado por objetivos, metas y tareas fundamentales. (Decreto 585 de 1991).

Este proyecto de investigación se centra en la evaluación de impacto *ex ante* a nivel micro y meso.

### 2.3.1 El concepto de impacto

La definición de impacto es fundamental para la selección de la metodología a utilizar, dado que generalmente las evaluaciones de impacto se preocupan por saber cuál es el efecto causal de un programa sobre un resultado específico. Existen diversas definiciones de impacto, desde las más sencillas hasta las verdaderamente complejas.

Según la Real Academia Española “*Impacto*” se define como el efecto producido en la opinión pública por un acontecimiento, una disposición de la autoridad, una noticia o una catástrofe.

Según el Departamento Nacional de Planeación de Colombia –DNP– (Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas, 2013) impacto es el cambio logrado en las condiciones económicas o sociales de la población, como resultado de los productos y resultados obtenidos con el proyecto o programa.

Según la CEPAL (Ortegón and Prieto, 2005) la evaluación de impacto es un tipo de evaluación sumativa, que se realiza al final de una intervención para determinar en qué medida se produjeron los resultados previstos.

El Banco Mundial (Gertler et al., 2011) define la evaluación de impacto como la medición de los cambios en el bienestar de los individuos, que pueden ser atribuidos a un programa o una política específica.

En el marco del REF —Research Excellence Framework— del Reino Unido (Penfield et al., 2013) se define el impacto como un efecto, cambio o beneficio, que trasciende lo académico, para la economía, la sociedad, la cultura, las políticas o servicios públicos, la salud, el ambiente o la calidad de vida. Ellos consideran que la comprensión del término “impacto” varía considerablemente y por tanto los objetivos de la evaluación de impacto deben ser completamente entendidos antes de recolectar la evidencia. Sugieren desarrollar sistemas que no solamente registren la información de impacto sino que permitan capturar las interacciones entre los investigadores, la institución y los *stakeholders* para enlazarlas

con los resultados de la investigación, con el fin de proveer una red de datos, además de información relevante y útil para la evaluación.

Según la OCDE (OCDE, 2002), los impactos son efectos de largo plazo, positivos y negativos, primarios y secundarios, producidos directa o indirectamente, intencionalmente o no, como resultado de la intervención de políticas, programas o proyectos.

La definición que se tome tiene implicaciones metodológicas. Por ejemplo en la definición del REF es necesario identificar todos los interesados y evaluar sus interacciones y sus dinámicas, lo cual por supuesto requiere metodologías complementarias.

Para efectos de esta investigación el impacto será entendido, en un marco amplio, tal como lo define la OCDE. A su vez, se entenderá la evaluación de impacto desde la concepción que le dan los organismos internacionales de financiación multilateral como el Banco Mundial y el BID, en la cual se enlaza la evaluación de impacto de programas con el diseño de políticas públicas basadas en la evidencia y la toma de decisiones estratégicas para mejorar, rediseñar, extender o eliminar el programa objeto de evaluación.

### 2.3.2 Impactos de proyectos de investigación

La caracterización de impactos de programas o proyectos de investigación depende del proceso de generación de conocimiento, de la capacidad de absorción de ese nuevo conocimiento y de las condiciones del entorno para poderlo aplicar. Es así como un mismo programa de investigación tiene efectos distintos en un país de los llamados en vías de desarrollo que en un país desarrollado. Como expresa Olmedo (Olmedo, 1980),

*En los países desarrollados la mayor parte (aproximadamente 2/3) de los recursos dedicados a la investigación y desarrollo son aplicados a los sectores más dinámicos o industrias de punta —aeroespacial, electrónica, energía nuclear, petroquímica y armamentos de todo tipo— que resultan de poco o ningún interés para los países en desarrollo. Los países en desarrollo también dedican una porción idéntica de sus menguados recursos en investigación y desarrollo (es decir 2/3) a investigaciones básicas frecuentemente orientadas por los problemas de los países industrializados, y no por sus verdaderos problemas..*

De otra parte, los impactos de programas de investigación han estado generalmente asociados sólo al ámbito científico, pero en la realidad se dan impactos también en los ámbitos sociales, económicos, políticos y culturales. La dificultad está en la causalidad, es decir, en poder asegurar que el impacto se da como resultado de la implementación del programa o proyecto de investigación y, en este sentido, es fundamental reconocer que es imposible atribuir al programa todos los cambios que se dan en los diversos ámbitos de la sociedad.

Para Forero (Forero et al., 2016), los impactos se conciben como efectos visibles y valorables en distinto grado que resultan del entrelazamiento de acciones de ciencia y tecnología orientadas por los programas y políticas generales del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. En su estudio los resultados de programas de investigación pueden organizarse en tres tipos: productos, logros y efectos y, además, en tres niveles: macro,

meso y micro. De esta forma se puede construir una matriz de impacto sistémico que permita organizar el análisis de impacto. Por su parte, para Villaveces (Villaveces, 2004) los productos se refieren a los resultados tangibles puestos en circulación; los logros se refieren a los resultados previstos y obtenidos y los efectos a los resultados cuyo ámbito trasciende al del grupo de referencia. La medición de los impactos puede clasificarse en tres ámbitos: el de la producción; el de las ciencias básicas y academia; y el de las políticas públicas. Para cada ámbito, conceptualiza indicadores para evaluar la marcha de los procesos de valoración del conocimiento. Estos indicadores los clasifica en cinco categorías:

1. Construcción de redes de conocimiento.
2. Permanencia de ciertas actividades o procesos críticos.
3. Magnitud de las respuestas a los esfuerzos agregados en cada ámbito.
4. Desarrollo de incentivos que dan sustentabilidad a los procesos.
5. Externalidades que generan los procesos de investigación a nivel de la sociedad.

Esta metodología se aplicó en Colombia a la evaluación del programa nacional de biotecnología. El resultado es cualitativo y descriptivo. Sin embargo, concluye que el programa de biotecnología generó impactos positivos.

A nivel internacional el Consejo de Investigación del Reino Unido — Research Councils UK (RCUK) considera que las investigaciones que financian generan impactos académicos, económicos y sociales con beneficios a nivel de los individuos, de las organizaciones y de la nación. Proveen una lista de los tipos de impacto como una indicación del conjunto potencial de impactos que pueden ser generados a partir de la investigación (Research Council UK, 2017).

Entre los impactos académicos están:

- Mejora de la economía del conocimiento.
- Desarrollo y utilización de metodologías nuevas e innovadoras, equipos, técnicas, tecnologías y enfoques multidisciplinares.
- Formación y entrenamiento de investigadores altamente cualificados.

Entre los impactos económicos y sociales se cuentan:

- Mejora en el enriquecimiento cultural, la calidad de vida, la salud y el bienestar.
- Contribución a la creación de riqueza y prosperidad económica; es decir, a la creación y el crecimiento de empresas y empleos; a mejorar los ingresos empresariales y la capacidad de innovación.
- Mejora en la efectividad de los servicios públicos.

La Academia de Finlandia que financia investigación científica de alta calidad con cerca de 240 millones de euros por año, lo cual representa el 15% del gasto estatal de la I+D en ese país, realizó una evaluación de impacto de doce proyectos con el fin de proveer información sobre los métodos de evaluación de impacto utilizados internacionalmente en organizaciones similares a la Academia (Kanninen and Lemola, 2006). En su estudio clasificaron los impactos de la siguiente manera:

1. Impactos de la asignación de recursos de financiación en las organizaciones de investigación
2. Impactos sobre la ciencia, los investigadores y la comunidad científica en general.
3. Impactos sobre la interacción y transferencia de conocimiento entre los centros de investigación y los otros tipos de organizaciones tales como empresas y agencias del Estado.
4. Impactos de la utilización del conocimiento generado en la investigación por parte de otros centros de investigación.

A su vez, identificaron tres tipos de actores: las agencias financiadoras, los investigadores ejecutores de la investigación y los usuarios de la investigación. Los impactos se materializan a través de las actividades e interacciones entre estos actores. Desde este enfoque se considera que la actividad de evaluación de impacto debe ser vista como un sistema que provee información estratégica y apoya el desarrollo y evolución de la Academia en el largo plazo. Por ejemplo, apoya la asignación de recursos en áreas con mayor potencial para generar impactos de acuerdo con las necesidades de la sociedad. A partir de lo anterior se concluyó que, a nivel nacional, la evaluación podría ser complementada con indicadores de comercialización de la investigación en universidades y centros de investigación con el fin de hacer mas visible la utilidad de la investigación.

Godin y Doré (Godin and Doré, 2004) realizaron una propuesta para evaluar el impacto de la ciencia en la sociedad y, en ese marco, diseñaron una lista de impactos en once dimensiones: ciencia, organización, tecnología, salud, economía, ambiente, cultura, simbolismo, sociedad, entrenamiento y política. A su vez, presentaron una lista preliminar de indicadores de medición de los impactos clasificados en cada dimensión.

Es de anotar que la medición de impacto de la ciencia ha sido un tema bastante discutido y sobre el cual no se ha logrado un consenso. Existen indicadores que intentan valorar intangibles y por lo tanto son difíciles de medir, existen otros muy subjetivos y difíciles de estandarizar. Es por ello que se han diseñado nuevas metodologías de evaluación de impacto cuyo uso depende de diversos factores como la magnitud de la financiación, el tiempo de implementación del programa, su cobertura y la disponibilidad de los datos, entre otros.

# Capítulo 3

## Evaluación de impacto de proyectos de investigación

### 3.1 Antecedentes

Los primeros desarrollos en evaluación de impacto de programas de Investigación y Desarrollo (I+D) comenzaron en los años 1970, cuando se empezó a cuestionar el valor económico y social de la inversión en I+D. Una primera revisión de la literatura en este campo fue el trabajo de Griliches ([Griliches, 1979](#)) en el cual se presentaron las principales características del problema en el contexto de funciones de producción y se discutieron las dificultades existentes para su estimación.

Entre los primeros estudios enfocados desde el punto de vista econométrico se cuenta el de Hall y Mairesse ([Hall and Mairesse, 1995](#)), quienes sugirieron que el impacto social de la inversión en I+D se podría medir como la diferencia entre el retorno social del gasto en I+D y el costo social de la inversión. Desde entonces, el costo social de la inversión refleja el costo de oportunidad de invertir los recursos en I+D, en vez de en otra alternativa. El retorno social representa los beneficios para la sociedad, resultantes de la inversión en I+D.

Algunos de los estudios desde entonces han investigado el impacto de la inversión pública en I+D a través de una revisión del impacto que producen sobre el desempeño de las firmas apoyadas. Sin embargo, se le ha dado relativamente poca importancia al efecto de los “*spillovers*” derivados de la I+D. En trabajos posteriores se desarrollaron enfoques orientados a valorar el efecto de los “*spillovers*” y su medición. Notable entre éstos es el trabajo de Mairesse y Mohnen ([Hall et al., 2009](#)). Algunos de los primeros en estudiar efectos de los “*spillovers*” interindustria (intersector) fueron Mamuneas y Nadiri ([Mamuneas and Nadiri, 1996](#)). Bonte ([Bönte, 2004](#)) amplió el modelo para incluir el efecto de los “*spillovers*” intersectoriales derivados de la inversión en I+D por parte del sector público y privado, en forma separada. Este trabajo se aplicó al caso de la industria alemana.

Desde hace bastante tiempo se reconoció la existencia del denominado problema de evaluación. Éste consiste en que en cualquier estudio de impacto, es posible observar

individuos o grupos que participan o no del programa que está siendo evaluado. Pero nunca se pueden considerar individuos que estén en las dos condiciones. Por lo tanto, la evaluación de impacto implica que es necesario hacer algún tipo de suposición acerca de las decisiones que podrían haber tomado individuos que nunca estuvieron en posición de tomarlas. Solo de esta manera es posible establecer los denominados contrafácticos que deberían caracterizar los efectos de los participantes en un programa, si no hubieran participado en él.

Una de las referencias fundamentales para la evaluación de impacto la constituye el artículo de Roy (Roy, 1951), quien considera la forma como se distribuyen los ingresos en un sistema económico. Aunque en realidad su enfoque se refiere casi exclusivamente a las desigualdades en la distribución de beneficios en la sociedad debido a los programas de capacitación para el trabajo, sus métodos y enfoque se extienden a la evaluación de impactos de prácticamente cualquier proyecto. Uno de los aspectos señalados por Roy es la existencia del mecanismo de autoselección, el cual consiste en que las decisiones que un individuo toma incluyen con frecuencia también los mercados en los cuales va a participar. Es frecuente que algunos individuos o grupos decidan excluirse voluntariamente de mercados como trabajo, educación, lugar de residencia o de otras alternativas. Esto conduce a que en muchas ocasiones las relaciones entre variables representen relaciones que ocurren como resultado de las diferentes decisiones de optimización tomadas por los individuos y no necesariamente constituyan relaciones causales. Ejemplos de este problema han sido considerados en el análisis de la elección de escuelas o universidades por parte de grupos minoritarios como latinos o afroamericanos en los Estados Unidos. En su trabajo, Borjas (Borjas, 1987) aplicó esta idea a la estimación de las desigualdades en los ingresos de personas con educación comparable entre los ciudadanos de un país y los inmigrantes. Borjas concluye que muchos inmigrantes se auto-excluyen de muchas oportunidades por muchas causas, entre las cuales puede figurar hasta el sistema político al cual están acostumbrados.

Otro aspecto fundamental para la evaluación de impacto de diferentes programas sociales es la necesidad de efectuar un diseño de los programas y de las evaluaciones de tal manera que se puedan hacer asignaciones en forma aleatoria en la medida de lo posible. Rubin (Rubin, 1974), en particular, sentó las bases para la consideración de las ventajas de diseños aleatorizados y cómo estos afectan la confiabilidad de las estimaciones de relaciones causales. Sin embargo, Rubin también mostró que esto a menudo no es posible y que, en ese caso también es posible obtener estimaciones adecuadas mediante un uso cuidadoso de datos provenientes de experimentos o programas no aleatorizados.

## 3.2 El problema de evaluación de impacto

El problema de evaluación de impacto de programas está ligado al diseño de políticas públicas. Hoy en día es indispensable conocer los resultados e impactos de los programas para tomar mejores decisiones, reorientar la política, asignar los recursos presupuestales, rendir cuentas a la sociedad e incrementar la eficiencia y eficacia del Estado. La tendencia

de formular políticas públicas basadas en la evidencia es una tendencia mundial creciente que ha generado recientemente un gran interés por las metodologías de evaluación de impacto, las cuales permiten aplicar un conjunto de herramientas cuantitativas para verificar la calidad y efectividad de las intervenciones. De esta manera se generan evidencias sólidas de los resultados y confianza en los ciudadanos.

De otra parte, es fundamental aclarar que no todos los planes, programas o proyectos justifican la realización de una evaluación de impacto, pues éstas suelen ser costosas. Según Bernal y Peña ([Bernal and Peña, 2011](#)), la evaluación de impacto no es recomendable cuando los beneficios de un programa no son cuantificables o no buscan resultados tangibles, cuando los programas no están claramente definidos o cuando el análisis costo – beneficio de la evaluación es más recomendable.

Según Gertler *et al.* ([Gertler et al., 2011](#)), cuando se está planeando una evaluación de impacto, responder una serie de preguntas básicas ayuda a tomar la decisión: ¿cuántas personas van a ser afectadas por el programa?, ¿cuál es el presupuesto asignado?, ¿cuáles son los impactos esperados del programa?, ¿existen evidencias en programas similares?; entre otras. En ocasiones se utilizan las pruebas piloto para responder algunas de las preguntas, especialmente durante la implementación de programas nuevos con alta incertidumbre.

Aunque el marco de referencia requiere la estimación solamente de los efectos de largo plazo es necesario admitir que en la práctica la principal, si no la única, información que es posible relacionar de manera causal con un proyecto es la que se produce a corto plazo, como por ejemplo productos del proyecto, publicaciones, patentes, prototipos, etc. Esto quiere decir que es necesario considerar efectos de largo plazo, pero también los efectos de mediano y, a veces, corto plazo de la financiación de un proyecto determinado. No solo se deben considerar efectos a nivel local (micro), como el desarrollo de proyectos de investigación, sino también efectos más extendidos (a nivel meso-espacial) como los que afectan a las instituciones, generalmente universidades, donde los proyectos se desarrollan. Finalmente, se podrían evaluar los efectos macroeconómicos, incluyendo las relaciones de cooperación, la apropiación social de los resultados, la mejora en el nivel de bienestar de una población, como resultado de los impactos de un programa.

La premisa fundamental sobre la cual se basa la estimación de los impactos debidos a un programa o proyecto es que es posible, de alguna manera, establecer una cadena de eventos que conducen a los resultados del proyecto. Esto es lo que Gertler *et al.* ([Gertler et al., 2011](#)) denomina una teoría del cambio. Tal como lo expresa Gertler , “Una teoría del cambio es una descripción de la forma como una intervención debería lograr sus resultados. Describe la lógica causal de cómo y por qué un proyecto, programa o política alcanza sus objetivos propuestos” ([Gertler et al., 2011](#)). Una teoría del cambio modela la sucesión causal a través de una **Cadena de Resultados**. Esta constituye una sucesión lógica de pasos en los cuales, los insumos, actividades y resultados que hacen parte del proyecto, producen los resultados o impactos mediante su interacción entre ellos y con los actores involucrados. Gertler también propone una estructura “canónica” para la cadena de resultados. En dicha propuesta, existen cinco componentes básicas cuya interacción lleva a los impactos reales del proyecto: Insumos o entradas, Actividades, Resultados,

Logros y Resultados finales o de largo plazo. En una cadena de resultados, es, entonces, necesario describir cómo los insumos se usan para llevar a cabo las actividades y producir los resultados. Los resultados de los proyectos o programas son los que, al ser usados o aplicados por los sectores involucrados (grupos de investigación o universidades, por ejemplo) producen impactos o logros de mediano plazo y éstos a su vez conducen a logros de largo plazo.

La cadena de resultados incluye dos grandes divisiones: la primera que es la etapa de implementación o ejecución del programa y está casi completamente bajo el control de los ejecutores (grupos de investigación, generalmente) conduce a una oferta de resultados que pueden ser usados o demandados por el resto de los actores involucrados en una segunda etapa; esta segunda etapa de resultados está caracterizada por la interacción entre la oferta y la demanda. Todo esto se lleva a cabo dentro de un entorno caracterizado por las premisas que establecen un ambiente donde se desarrolla la dinámica del cambio y de las interacciones. Lo anterior está sujeto a incertidumbres que introducen riesgos acerca del logro de los impactos esperados.

Con base en estos trabajos, es posible formalizar el problema de evaluación de impacto, de la siguiente manera: supongamos que  $Y_i$  es el valor de una variable seleccionada para describir un impacto de un programa o tratamiento, como se denomina en la literatura del área. En el caso que nos ocupa, la aplicación de un tratamiento podría significar que un proyecto determinado recibió financiación. Podemos definir una variable de decisión  $D_i$  cuyos posibles valores son 0 ó 1. El valor  $D_i = 0$  indica que se tomó la decisión de no aplicar el tratamiento en el individuo  $i$ -ésimo. Similarmente,  $D_i = 1$  se refiere a los individuos a quienes sí se les aplicó el tratamiento.

El efecto que la aplicación del tratamiento tiene sobre un individuo  $i$ -ésimo está dado por la ecuación:

$$\tau_i = Y_i(1) - Y_i(0),$$

donde  $Y_i(0)$  es el valor de la variable observada (resultado) en el individuo  $i$ , cuando no es sometido al tratamiento ( $D_i = 0$ ) y  $Y_i(1)$  es el valor de la variable observada cuando sí recibe el tratamiento ( $D_i = 1$ ). Esta ecuación ilustra bien el problema fundamental de la evaluación de impacto. Los valores  $Y_i(1)$ ,  $Y_i(0)$  se refieren a las respuestas **del mismo individuo** ante la aplicación, o no, del tratamiento. Puesto que esta situación es generalmente imposible de observar (porque se trata del mismo individuo), entonces no es posible estimar el impacto del tratamiento mediante mediciones individuales.

Sin embargo, el valor promedio o esperado del efecto del tratamiento  $\tau_{ATE}$  (ATE: *Average Treatment Effect*) tal vez sí pueda ser determinado:

$$\tau_{ATE} = E[\tau_i] = E[Y_i(1) - Y_i(0)].$$

Ahora bien, si podemos suponer que los individuos sujetos a tratamiento no difieren fundamentalmente de los que sí lo reciben entonces podríamos hacer la suposición de que los valores promedios del impacto se pueden estimar usando

$$\begin{aligned} \tau_{ATE} &= E[Y_i(1) - Y_i(0)] \\ &= E[Y_i(1)] - E[Y_i(0)]; \end{aligned}$$

es decir, como la diferencia de los valores promedios de la variable  $Y_i$  entre los dos grupos.

Por lo tanto, en poblaciones homogéneas en las cuales no hay razón para suponer que los del grupo tratado son diferentes del Grupo de Control, bastaría con estimar los valores promedios de la variable observada en las dos poblaciones, como lo indica la ecuación anterior.

Existen algunos conceptos fundamentales en el tema de evaluación de impacto que hacen referencia a evaluaciones rigurosas, confiables y precisas. En las secciones siguientes se presentan estos conceptos.

### 3.2.1 Problema de atribución o inferencia causal

Generalmente en las evaluaciones de impacto se realizan preguntas de tipo causa-efecto con el fin de saber si el proyecto dio los resultados esperados y cumplió con el objetivo para el cual fue diseñado. Determinar causalidad no es tan sencillo y esto es conocido como el problema de atribución. Según la guía de evaluación de impacto del Banco Mundial, para atribuir causalidad entre un programa y un resultado se utilizan los métodos de evaluación de impacto que descartan la posibilidad de que cualquier factor, distinto al programa de interés, explique el impacto observado.

### 3.2.2 Contrafactuales

Como se ha mencionado antes, en una evaluación de impacto se debe identificar un grupo de participantes en el programa denominado “Grupo de Tratamiento” y un grupo de no participantes o **Grupo de Control**. Los del Grupo de Control deberían ser clones de los individuos del grupo de tratamiento. Se supone que si los dos grupos son iguales (participantes y no participantes), cualquier diferencia en los resultados proviene del programa. Para el caso de los proyectos de I+D esto constituye un desafío dado que los grupos deben ser idénticos en ausencia del programa, sus características deben ser las mismas y deben reaccionar de la misma manera al programa. Además, para evaluar el efecto de la financiación de proyectos, se debe tener en cuenta que los llamados diseños aleatorizados, en los cuales los miembros del grupo bajo tratamiento (financiados, para el caso que nos ocupa) se escogen al azar. Esto obviamente, en el caso de una convocatoria para financiar los proyectos mejor calificados, no es posible por razones éticas y económicas. Por lo tanto, los diseños aleatorizados basados en selección aleatoria de participantes quedan automáticamente excluidos de las técnicas destinadas a evaluar el impacto de proyectos de I+D. Por otra parte, el número no muy grande de proyectos, aunado a la gran heterogeneidad de los mismos, también impide los diseños basados en selección de submuestras aleatorias dentro de la población. Teniendo en cuenta lo anterior, es claro que la selección de los proyectos contrafactuales no es asunto trivial y su escogencia debe considerarse con cuidado.

### 3.2.3 Sesgo de la selección

En realidad, para ver el impacto completo de largo plazo que tiene la financiación sobre la capacidad del país para hacer investigación y desarrollo y, en el caso de la financiación de proyectos de investigación en salud, el impacto que tienen los resultados de los proyectos sobre la salud de la población colombiana, sería deseable hacer una evaluación donde la población no sujeta a tratamiento estuviera conformada por los grupos de investigación en el área temática seleccionada que no recibieron financiación. De esta manera, se evita el llamado sesgo de (auto)-selección, el cual se produce porque los grupos de investigación que participan en una convocatoria, así como los que no lo hacen, tienen ciertas características peculiares que los distinguen unos de otros. Un grupo que decide participar, elaborando una propuesta y haciendo el trámite requerido, suele tener más motivación, más capacidad y, probablemente más conocimientos que un grupo que pudiendo presentar su propuesta, no lo hace. Por lo tanto, no es razonable suponer que el efecto de la financiación sobre el grupo no participante pudiera ser similar al que tendría sobre un grupo con más trayectoria como los que participaron en la convocatoria. En este sentido, es claro que la selección del Grupo de Control y del de tratamiento no es de ninguna manera trivial ni es un problema resuelto en la literatura utilizada en el estado del arte ni en las búsquedas realizadas en las bases de datos especializadas. También debe ser claro que el Grupo de Control podría estar constituido por dos subpoblaciones: los que no presentaron proyectos y los que sí los presentaron pero no recibieron financiación.

Supongamos que  $Y$  es el valor de la variable seleccionada para describir un impacto de una convocatoria para financiar proyectos de investigación. Para el caso que nos ocupa, vamos a suponer un grupo de investigación cuya línea de investigación incluye alguna relacionada con la temática de interés (malaria); estos grupos serán denominados Grupos del área de interés. Consideremos un proceso de selección en dos etapas. En la primera etapa, algunos grupos del área de interés deciden elaborar una propuesta y participar en la convocatoria para buscar financiación para su proyecto. Es en esta primera etapa donde el sesgo de auto-selección es fundamental. En una segunda etapa, los proyectos propuestos son evaluados por pares y algunos de ellos reciben financiación para su desarrollo. Vamos a definir, por lo tanto, una variable de decisión vectorial con dos componentes  $D_i$  cuyos posibles valores son 00, 10, 11.

$$D_i = \begin{cases} 00 & \text{No participa en convocatoria} \\ 10 & \text{Participa. No es financiado} \\ 11 & \text{Participa. Recibe financiación} \end{cases}$$

Estamos suponiendo, entonces, que el tratamiento consiste de dos etapas o niveles. La aplicación de un tratamiento solo de la primera etapa quiere decir el caso 10 y el de segunda etapa significa el caso 11.

El efecto que la aplicación del tratamiento tiene sobre un individuo (grupo)  $i$ -ésimo está dado por la ecuación:

$$\tau_i = Y_i(11) - Y_i(10) - Y_i(00),$$

donde  $Y_i(00)$  es el valor de la variable observada (resultado) en el individuo  $i$ , cuando no es sometido al tratamiento (No participa en la convocatoria —  $D_i = 00$ ),  $Y_i(10)$  es el valor de la variable observada cuando el individuo participa de la convocatoria pero su proyecto no es financiado ( $D_i = 10$ ). Finalmente,  $Y_i(11)$  representa la respuesta del individuo (grupo) que recibe el “tratamiento completo”; es decir, los que participan en la convocatoria con una propuesta que es financiada ( $D_i = 11$ ). La ecuación anterior, muestra la dificultad adicional de una evaluación de este tipo. Los valores  $Y_i(00), Y_i(10), Y_i(11)$  se refieren a las respuestas **del mismo individuo** a la aplicación de cada uno de los tratamientos. Puesto que esta situación es obviamente imposible de observar, no es posible estimar el impacto del tratamiento mediante mediciones individuales. Sin embargo, el valor promedio o esperado del efecto del tratamiento tal vez si pueda ser determinado:

$$\tau_{ATE} = e[\tau_i] = E[Y_i(11) - Y_i(10) - Y_i(00)].$$

Ahora bien, si se pudiera suponer que los grupos de investigación que no presentan propuestas tienen características similares a los de los grupos que sí las presentan, y si es posible además suponer que los grupos cuyos proyectos son financiados no son diferentes de los grupos cuyos proyectos no lo fueron, entonces sería posible calcular los impactos como la diferencia de los valores estimados de la variable de impacto en los diferentes grupos:

$$\tau_{ATE} \approx E[Y_i(11)] - E[Y_i(10)] - E[Y_i(00)];$$

es decir, como la diferencia de los valores promedios de la variable  $Y_i$  entre el grupo 11 y los otros dos.

Este modelo, sin embargo, subestima los impactos de una convocatoria para financiar proyectos de investigación. Por ejemplo, el solo hecho de preparar una propuesta, como resultado de la convocatoria, introduce una dinámica en los grupos de investigación que, sin duda, contribuye a su crecimiento. Es necesario, por lo tanto, ampliar un poco la consideración para tener en cuenta todos estos efectos.

Por otra parte, es evidente que los grupos con más capacidades suelen presentar mejores propuestas con mayor probabilidad de éxito en un proceso de evaluación por pares. También es muy probable que los grupos más desarrollados y mejor estructurados pueden aprovechar de mejor manera los recursos de financiación. Por lo tanto, la comparación de los valores actuales de la variable que cuantifica el efecto puede no ser suficiente para estimar los impactos.

Un modelo que permite tener en cuenta estas características puede ser el de comparar las diferencias entre las diferencias temporales de los distintos grupos. Supongamos que  $Y_{i0}(00), Y_{i0}(10), Y_{i0}(11)$  representan los valores de la variable que mide el impacto al comenzar el tratamiento o programa de financiación (línea de base). Sean  $Y_{if}(00), Y_{if}(10), Y_{if}(11)$  los valores correspondientes al final del período de análisis. La diferencia entre los valores actuales y los iniciales para cada grupo son:

$$\Delta_{00} = Y_{if}(00) - Y_{i0}(00)$$

$$\Delta_{10} = Y_{if}(10) - Y_{i0}(10)$$

$$\Delta_{11} = Y_{if}(11) - Y_{i0}(11).$$

A partir de estas diferencias temporales, sería necesario estimar los efectos del programa de financiación de proyectos de investigación. También falta por determinar cómo considerar la heterogeneidad en la respuesta al tratamiento dentro de cada grupo y cómo incluir el efecto de variables exógenas que afectan la dinámica de los grupos. Pero estas consideraciones permiten establecer el panorama general.

### 3.3 Evaluación de impacto de proyectos de investigación

En el año 2015 en Colombia se invirtieron 638.6 millones de dólares para la financiación de la investigación y desarrollo — I+D, lo cual representa el 0.23% del Producto Interno Bruto —PIB. Durante el mismo periodo, la inversión en actividades de ciencia y tecnología fue de 1562 millones de dólares, correspondiente a un 0.62% del PIB ([Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, 2015](#)). Aunque esta cifra parece muy baja en relación con otros países, de todas maneras representa un esfuerzo considerable en una economía de recursos escasos para inversión. Algunos sectores del país cuestionan la conveniencia de invertir esa magnitud de recursos en una actividad que consideran de baja prioridad, con rendimientos inciertos y a largo plazo; sugieren que estos recursos sean invertidos en actividades más urgentes y con resultados visibles en el corto plazo.

Durante las últimas décadas se han desarrollado e implementado exitosamente varias metodologías de evaluación de impacto que son utilizadas rutinariamente para la evaluación de proyectos de inversión social. Existen varios métodos para llevar a cabo la evaluación, incluyendo métodos experimentales y cuasi-experimentales. Sin embargo, por su naturaleza estos métodos han sido diseñados para la evaluación de los impactos de proyectos con las características de inversión social. El desarrollo de métodos para la evaluación de los impactos de programas y proyectos de I+D ha recibido mucho menos atención, y sólo recientemente se han tratado de formalizar y sistematizar dichas herramientas. Podría afirmarse que aún existe un vacío de conocimiento en esta temática.

A su vez, en Colombia se han realizado pocos proyectos de evaluación de impacto de programas y/o proyectos de investigación. Colciencias realizó en el año 2000 un primer estudio que denominó “Estudio de análisis de impactos del financiamiento de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico, 1995 - 1999”. Posteriormente, en el año 2006, realizó una convocatoria con el fin de recibir propuestas para realizar la evaluación de impactos y resultados de proyectos de investigación y desarrollo e innovación financiados por Colciencias en el periodo 1999 - 2005. De esta convocatoria se generaron tres estudios en tres regiones del país y se concluyó que este es un inicio en estudios de evaluación de impacto que invita a adoptar metodologías de evaluación de impactos y a generar indicadores que permitan efectuar comparaciones a nivel nacional e internacional. En 2008 se realizó un estudio sobre el impacto del financiamiento en investigación en salud Colciencias 1970 – 2007, el cual comparó los resultados de la financiación de los proyectos de investigación en salud por periodos, temas y enfoques, y analizó las capacidades científicas y tecnológicas de los grupos de investigación que recibieron financiación. ([Jaramillo et al., 2009](#)).

En la actualidad existe una cartilla que elaboró Colciencias con las experiencias en evaluación de ciencia, tecnología e innovación 1997 – 2015. En esa cartilla se clasificaron y analizaron 23 estudios encomendados por Colciencias a entidades externas en los últimos 20 años. Según la temática, el 39% de los estudios se enfocó en el análisis de la inversión pública en investigación y desarrollo, el 22% en el apoyo a la formación altamente calificada y el 13% en apoyo a la innovación. De acuerdo con el tipo de evaluación, el 69% fueron evaluaciones de resultados (16 ejercicios), el 16% fueron evaluaciones institucionales y solamente el 13% (3 estudios) fueron evaluaciones de impacto: dos sobre formación de capital humano y únicamente un estudio sobre impacto del financiamiento de Colciencias a la I+D+i en el periodo 2005-2013. La información disponible indica que se trata de evaluaciones *ex post* y, hasta la fecha, en Colombia no se han realizado evaluaciones *ex ante* de programas o proyectos de investigación.

A nivel internacional, se reconoció desde finales del siglo XX, la necesidad de evaluar la conveniencia de invertir recursos en programas de investigación, cuando los recursos son limitados y hay otras necesidades, a veces más apremiantes. Uno de los primeros esfuerzos significativos en esta dirección se originó con el Health Economics Research Group (HERG) en la Universidad de Brunel, en Inglaterra, en colaboración con RAND–Europe. En este trabajo (Buxton et al., 2004), se propuso una metodología que, posteriormente, ha sido adoptada por diferentes países, regiones y organizaciones. Se trata del llamado “Payback Framework”, en el cual se incluyen tanto productos académicos como beneficios sociales. Desde el comienzo se creó con el fin de evaluar impactos de investigaciones en salud (Buxton et al., 2004). Posteriormente, la metodología ha sido adaptada a la valoración de impactos en otras áreas de investigación. Un impulso decisivo para la popularización de esta metodología fue provisto por el estudio que la Arthritis Research Campaign adelantó junto con la organización RAND-Europe, con el fin de evaluar la efectividad de los fondos asignados a la investigación acerca de la artritis. Para ello se diseñó un cuestionario cuyo objetivo era tratar de capturar la mayor cantidad posible de efectos e impactos resultantes de los proyectos financiados.

Por otra parte, en el Reino Unido, se ha utilizado desde 1999 una metodología para evaluar los programas de investigación asociados con las diferentes universidades a través del denominado RAE —Research Assessment Exercise—, el cual se ha llevado a cabo en forma periódica, cada cinco años. Los resultados de la clasificación resultante del RAE se utilizan para asignar recursos de investigación a los diferentes programas y centros de investigación. Una de las áreas más afectadas por este sistema ha sido la investigación en salud. De hecho, se ha podido demostrar que varias facultades de medicina han tenido que modificar seriamente sus prioridades en la enseñanza con el fin de enfocarse más en la investigación. Como resultado, se han levantado algunas voces de protesta que cuestionan la conveniencia de la metodología para asignar fondos a las facultades de medicina (Tomlinson, 2000). También ha habido críticas al ejercicio del RAE, sobre la base de posibles sesgos en la asignación de las calificaciones (Roberts, 1999).

Con base en el modelo Payback, la Academia Canadiense de Ciencias de la Salud (CAHS) desarrolló su modelo CAHS, en el cual se ajustaron algunos puntos que fueron considerados como debilidades del modelo Payback y se hizo una implementación en el

programa CIHR (Canadian Institute of Health Research), el cual ha sido replicado en varias provincias, especialmente en Alberta, a través del programa Alberta Innovates (Graham et al., 2012).

### 3.4 Experiencia reciente de evaluación en Colombia

Uno de los métodos más usados para evaluar los efectos de las inversiones, denominado “Diferencias en Diferencias”, compara el efecto promedio entre los individuos de un grupo con los del otro (tratados vs control) cuantificado mediante el cambio de las variables de resultado, medidas antes y después de la implementación del programa. Los efectos se miden individualmente y se promedian en cada grupo. Existe una amplia literatura acerca del diseño de estos estudios, incluyendo pruebas estadísticas rigurosas que permiten juzgar la significancia de los estimativos de impacto. Para que la estimación de los efectos sea adecuada, los dos grupos deben ser estadísticamente independientes, condición que se garantiza con la asignación al azar de los individuos a los grupos. Esta metodología ha sido propuesta para estimar los efectos de la financiación de proyectos de investigación. En dicho caso, la premisa básica significa que para que este método sea aplicable en la evaluación de impacto de la financiación, la selección de los proyectos escogidos para ser financiados debería haberse hecho al azar, sin tener en cuenta la calidad de la propuesta ni ninguna otra característica del proyecto o del grupo. Lo cual es inadmisibles en este caso.

Colciencias contrató en 2013 el estudio “Evaluación de financiamiento de Colciencias a la investigación y el desarrollo y la innovación”, cuyo objetivo era “Determinar la efectividad de la financiación otorgada por Colciencias con fines de promover la investigación científica y tecnológica, a través de la financiación de proyectos de Ciencia Tecnología e Innovación...” En dicho estudio, se usó básicamente el cálculo de diferencias en diferencias para evaluar los efectos de la financiación, comparando el conjunto de grupos de investigación que recibieron financiación con los que presentaron propuestas de proyectos pero no fueron financiados. Se calcularon valores promedio de algunas variables para los grupos y sus investigadores para un período de tiempo antes y para otro período después de recibir la financiación. El impacto de la financiación se estimó, entonces, como la diferencia de diferencias entre los dos grupos.

Esta metodología no es la más indicada cuando estamos evaluando el impacto de programas de investigación puesto que, en primer lugar, la selección de los grupos de investigación o investigadores a los grupos de tratamiento y control (“Financiados” vs “No financiados”) no puede hacerse al azar. De hecho, los miembros de la clase “Financiados” usualmente tienen características diferentes a los no financiados. Los dos grupos no son homogéneos. Por lo general, los financiados pueden hacer mejores propuestas de investigación. Por lo tanto, la premisa básica de que las diferencias se deben fundamentalmente a la financiación no tiene sustento. En segundo lugar, la población de grupos de investigación incluye también los que decidieron no presentarse a la convocatoria. Y los que sí presentaron propuesta probablemente también experimentaron progresos como resultado de su

elaboración y de los conceptos críticos de los evaluadores. Es decir, que como resultado del programa de financiamiento se produjo un avance en estos grupos también, el cual no debería restarse de los impactos sino sumarse. En tercer lugar, no es posible garantizar que los resultados promedios antes y después del programa sean independientes, como se mostrará a continuación.

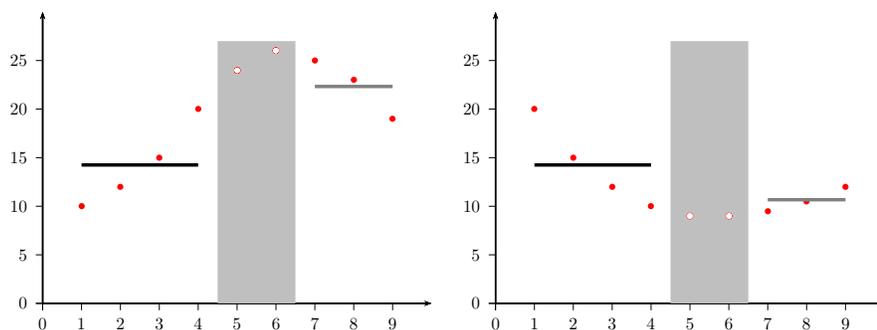


Figura 3.1: Resultados de la investigación acumulados por período.

Ilustración de la inconveniencia de usar diferencia entre valores medios para evaluar los efectos de la financiación de la investigación. Los puntos indican los resultados de la investigación acumulados por período. La zona gris es el período durante el cual se desarrolló el proyecto financiado. Las líneas continuas muestran el promedio de los resultados de los años considerados. En la figura (a) hay una diferencia grande entre la situación pre y pos financiamiento, Sin embargo, parece que el efecto no fue muy benéfico. Lo contrario ocurre con la figura (b). Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto poco deseable del estudio es la ausencia de análisis de la incertidumbre. Cualquier estimación de los impactos debería, cuando menos, incluir un intervalo de confianza que permita establecer la incertidumbre inherente en la estimación, a partir de datos empíricos. Y la estimación de la diferencia o impacto no es aceptable sin conocer cuánto puede desviarse ésta, en la realidad, de los valores calculados. En conclusión, las técnicas utilizadas para estimar significativamente la diferencia pierden su validez.

Los procesos de investigación tienen un carácter dinámico en el cual los efectos de las intervenciones son acumulativos y no son inmediatos. Esto significa que el resultado, es decir la producción de un investigador o grupo en un tiempo determinado, depende fuertemente de su producción en momentos anteriores. Entonces, cualquier evaluación de los efectos de la financiación que no tenga en cuenta estos procesos dinámicos de mediano y largo plazo puede dar resultados muy imprecisos. Por lo tanto, se requiere un punto de vista diferente del tradicional para el análisis de impactos en investigación.

La idea se ilustra en la Figura 3.1. En (a) el promedio de resultados posteriores a la financiación (zona gris) es superior al promedio en el período previo. Sin embargo, la dinámica parece indicar que el efecto del programa fue nocivo. En cambio en (b)

el promedio después de la financiación es inferior a los valores previos. Pero la dinámica parece indicar que la producción está creciendo y que el programa pudo haber sido benéfico al frenar la declinación en la producción. Una comparación de valores promedios, antes y después del programa de financiación fue justamente lo que se realizó en el estudio financiado por Colciencias.

En conclusión, consideramos que la metodología que se requiere para analizar el efecto de las inversiones de programas de investigación debe tener en cuenta los efectos dinámicos, acumulados, de la financiación sobre la producción de conocimiento. Los métodos estáticos, que no tengan estos efectos en cuenta, pueden dar resultados muy inexactos.

# Capítulo 4

## Evaluación de impacto *ex ante*

En este capítulo se presenta el estado del arte sobre la evaluación de impacto basada en métodos *ex ante*. En primer lugar, se describen algunos de los métodos, tanto analíticos como computacionales, desarrollados para las evaluaciones *ex ante* de programas sociales en general. Al final se describen las evaluaciones *ex ante* de programas de investigación, mucho menos numerosas y basadas en los métodos de carácter general.

### 4.1 Métodos econométricos de comportamiento

Marschak ([Marschak, 1953](#)) fue uno de los primeros en plantear el problema de hacer pronósticos de tipo económico, con el fin de diseñar políticas óptimas desde el punto de vista social o económico. En ese momento, el problema de evaluación *ex ante* se denominó **problema de predicción**, puesto que se basaba en la predicción de la demanda mediante funciones de utilidad para predecir el resultado de alguna intervención, desde el punto de vista económico. A partir de ese trabajo pionero, se desarrollaron diversas aplicaciones.

Los primeros trabajos se basaron en funciones de utilidad aleatorias para predecir la demanda de un nuevo bien (o servicio) antes de su introducción. De esta manera, se hacía posible evaluar, por anticipado, el efecto de distintas políticas de intervención (distintos programas o variedades de los mismos) para tratar de escoger el que tuviera un mayor efecto, dentro de un presupuesto predeterminado o el programa que lograra un efecto especificado de antemano, con mínimo costo.

Pronto se vieron las ventajas de este enfoque y las aplicaciones proliferaron. Algunas de las primeras aplicaciones de evaluaciones *ex ante* se dieron en el marco de la evaluación de alternativas para el planeamiento de sistemas de transporte. Entre estas aplicaciones es notable la de McFadden ([Domencich and MacFadden, 1975](#)), quien usó modelos de utilidad para predecir la demanda de pasajeros del sistema de transporte integrado de San Francisco y sus alrededores (BART). Este estudio tiene un especial interés porque se utilizaron datos reales de demanda, tras la construcción del sistema para evaluar la precisión de las predicciones del modelo.

La evaluación *ex ante* también ha sido utilizada para evaluar el impacto de subsidios sobre la demanda de vivienda, por Wise ([Wise, 1985](#)). En este trabajo se llevó a cabo un

experimento aleatorizado para determinar el impacto real de los programas de subsidio y se comparó con las predicciones del modelo. Este es uno de los primeros ejemplos de evaluación *ex ante* para estimar los efectos de programas sociales.

Más recientemente, se han realizado evaluaciones *ex ante* de los impactos de programas de subsidios condicionados (transferencias de dinero) para estimular conductas en varios sectores de países en desarrollo. En particular, se llevaron a cabo evaluaciones *ex ante* de programas de estímulo a la escolaridad en México, en los cuales se concede un subsidio a las familias cuyos hijos asisten a la escuela, en vez de trabajar. Este programa, denominado PROGRESA, consistió inicialmente en un experimento aleatorizado, en el cual un número de hogares, seleccionados al azar, fueron incluidos en el programa. Los demás hogares elegibles fueron estudiados como Grupo de Control. También se hicieron mediciones, basadas en encuestas al comienzo y al final del período de estudio. Por otra parte, Todd y Wolpin (Todd and Wolpin, 2003), (Todd and Wolpin, 2006) utilizaron un modelo de comportamiento, cuyos parámetros fueron estimados mediante información del Grupo de Control, para hacer una evaluación *ex ante* de los efectos sobre el grupo de tratamiento. Los resultados se compararon con la evaluación experimental de los impactos reales. Las estimaciones *ex ante* se encontraron dentro de un 30 % de las estimaciones reales y siempre en la misma dirección (si uno aumenta, el otro también). El programa PROGRESA ha servido como base para el análisis y comparación de numerosos enfoques y modelos de evaluación *ex ante*. Esto se puede ver, por ejemplo, Parker, Rubalcava y Teruel, (Parker et al., 2007) o Attanasio, Meghir y Santiago, (Attanasio et al., 2012).

Otra evaluación *ex ante* de transferencias condicionadas fue la realizada por Bourguignon, Ferreira y Leite (Bourguignon et al., 2002), al Programa denominado Bolsa Escola de Brasil, en la cual desarrollaron un modelo de microsimulación del proceso de toma de decisión de los hogares, una vez éstos reciben la transferencia de dinero, para enviar los niños al colegio. Los resultados señalan que el programa redujo la incidencia de la pobreza un poco más de un punto porcentual y que el coeficiente Gini cayó medio punto. Posteriormente, Gottschalk (Gottschalk, 2012), construyendo sobre este trabajo, extrae los datos de la encuesta nacional de hogares de 2009 y evalúa el programa Bolsa Familia (anteriormente Bolsa Escola). Desarrolla un modelo que tiene en cuenta la presencia de hermanos en una misma familia, lo cual altera los resultados finales. El modelo dividió los datos en dos secciones: niños entre 6 y 9 años y niños entre 10 y 17 y predijo el comportamiento de los hogares. Los resultados de la simulación muestran un efecto positivo significativo sobre las tasas de participación escolar y una sensible reducción del trabajo infantil, dado que la mayoría de niños que antes no estudiaban y decidieron hacerlo no consideraron la opción de estudiar y trabajar al mismo tiempo.

Las evaluaciones *ex ante* son ampliamente usadas para predecir impactos de tipo ambiental. Sin embargo, los modelos utilizados para estos análisis tienen poca relación con los que se usan para predicción de impactos de programas sociales.

## 4.2 Métodos de simulación

A mediados del siglo XX, G. Orcutt llamó la atención sobre las debilidades de los modelos de comportamiento, generalmente usados en estudios económicos en cuanto a la falta de información acerca de la variabilidad y características espaciales de las entidades individuales. Orcutt resumió así su opinión:

Estamos de acuerdo en que los modelos actuales de nuestro sistema socio-económico tienen un alcance demasiado estrecho en el sentido de que tienen poco que decir acerca de aspectos tan fundamentales como el tamaño y localización de poblaciones individuales, de hogares y de firmas (Orcutt, 1957).

Orcutt también discutió cómo la variabilidad y heterogeneidad entre individuos debía ser estudiada para poder hacer pruebas de hipótesis y cuantificar la incertidumbre y variabilidad dentro de la población. Lo presenta de esta manera: “También es cierto, aunque no tan reconocido, que los modelos actuales de nuestro sistema socio-económico únicamente predicen agregados y fallan al predecir distribuciones sobre individuos, hogares o firmas en clasificaciones uni o multi-variadas.” Orcutt (Orcutt, 1957)

Con base en estas consideraciones, se propone crear un nuevo tipo de modelo en el cual las unidades básicas tomadoras de decisiones (individuos, hogares, empresas, etc.) sean representadas en forma explícita e individual. Las heterogeneidades son, entonces, incluidas en el modelo simplemente mediante las características distintivas de las unidades. Se propone que la descripción se haga mediante distribuciones de probabilidad de los atributos y características individuales.

A partir de esta propuesta, empezaron a crearse métodos de simulación que consideran las unidades en forma individual. Esta tendencia ha llevado a la creación de lo que, hoy en día, se denomina Economía Computacional, o Economía Experimental.

En la actualidad se utilizan dos tipos de simulaciones para el análisis de programas de inversión: los métodos de Microsimulación y los Modelos Basados en Agentes. A continuación se presenta el estado del arte en el uso de cada uno de esos tipos de modelos para predecir impactos.

### 4.2.1 Microsimulación

Harding define Microsimulación, como

una técnica usada para modelar eventos complejos de la vida real por medio de la simulación de las acciones y los efectos de los cambios de política sobre las unidades individuales (micro unidades) que constituyen el sistema donde los eventos ocurren (Harding, 2007).

Harding hace también una descripción de sus usos potenciales: “La microsimulación es una herramienta valiosa usada por los tomadores de decisiones para analizar los efectos detallados agregados y sus distribuciones, a nivel micro, de políticas económicas y sociales existentes o propuestas.”

En los modelos de microsimulación se representa la población objeto de estudio por una población sintética con características similares a la población real. Por lo general, se requieren cantidades masivas de información de varios tipos, dependiendo del estudio. En los modelos de microsimulación se suelen incluir modelos del comportamiento en la toma de decisiones, tal como en los modelos econométricos, excepto que en las microsimulaciones, el modelo de comportamiento se utiliza a nivel individual y existe un modelo similar para cada individuo que compone la población. A veces, los modelos de toma de decisiones de cada individuo se basan en modelos probabilísticos tipo cadenas de Markov u otro tipo de proceso estocástico.

Los modelos de microsimulación se clasifican de varias formas. Desde el punto de vista de la evolución en el tiempo de las poblaciones, se pueden dividir en modelos estáticos y dinámicos. En los modelos estáticos se considera que las condiciones de población no cambian a lo largo del tiempo. En cambio, en los modelos dinámicos se representa la evolución de los individuos a medida que transcurre el tiempo. Los individuos se casan tienen hijos, cambian de trabajo, se jubilan, etc., a lo largo de su historia. El modelo dinámico tiene esto en cuenta para hacer las predicciones del impacto de las políticas que se quiere simular. Por otra parte, si se considera la representación del tiempo, los modelos pueden ser discretos o continuos. En los modelos discretos solamente se consideran eventos cada cierto período de observación. Por ejemplo, la información puede ser generada anualmente o mensualmente o semanalmente. Los modelos continuos representan la historia de la población para todos los instantes de tiempo. Una clasificación adicional de los modelos de microsimulación se obtiene cuando se considera la representación de la forma como los individuos toman decisiones y ajustan sus comportamientos ante condiciones variables; en este caso los modelos pueden ser basados en ecuaciones de comportamiento o, alternativamente, Modelos de Decisión Probabilística. Cuando los cambios de estado o de comportamiento son el resultado de una respuesta fija a los cambios institucionales o de mercado mediante un modelo de comportamiento, generalmente basado en funciones de utilidad o de otro tipo, hablamos de un modelo basado en ecuaciones de comportamiento. Si las respuestas son variables aleatorias que tratan de aproximar las distribuciones de probabilidad observadas en la práctica, mediante muestreo, aun cuando no existan bases económicas para esas reglas de decisión, el modelo se denomina Modelo de Decisión Probabilística. Por último, los modelos de microsimulación también pueden clasificarse en cerrados o abiertos, dependiendo de si el conjunto de individuos que compone la población permanece invariable o se modifica durante la simulación. (Ver Harding ([Harding, 2007](#)) y Li ([Li, 2011](#))) Una taxonomía mucho más exhaustiva de los modelos de simulación ha sido presentada por Brenner y Werker ([Brenner and Werker, 2007](#)).

Li, y O'Donoghue ([Li et al., 2012a](#)), ([Li et al., 2012b](#)), con base en la tesis de Li ([Li, 2011](#)), estudian algunos de los problemas más importantes para el desarrollo de modelos de microsimulación. A partir de las consideraciones propuestas por Harding ([Harding, 2007](#)), los autores analizan el efecto de la información disponible (data set) para crear las poblaciones sintéticas que componen el modelo. Puesto que se requieren numerosos datos tanto demográficos como de empleo, educación, movilidad, entre otros, es fundamental generar una base de datos que permita describir todos los aspectos relevantes de cada

individuo para la simulación. A menudo los datos disponibles no cubren el mismo período de tiempo y se hace necesario completar las series mediante algún mecanismo que conserve la integridad de la información. Li (Li, 2011) desarrolló un algoritmo denominado simulación en reversa (“*back simulation*”) que permite reconstruir la información necesaria para tener un modelo consistente con la respuesta histórica del sistema que se está simulando.

El segundo problema afrontado por Li y O’Donoghue (Li et al., 2012a), (Li et al., 2012b) fue el del alineamiento del modelo. Esto consiste en calibrar los parámetros del modelo de microsimulación para que sus resultados agregados a nivel de población o subpoblaciones coincidan con las proyecciones macroeconómicas. Este alineamiento puede hacerse para instantes discretos del tiempo o buscar que el alineamiento se mantenga a lo largo de la simulación. Li (Li, 2011) desarrolló también algoritmos para el alineamiento, mediante la técnica de “*back simulation*”.

Li y O’Donoghue (Li et al., 2012a), (Li et al., 2012b) usaron su modelo de microsimulación para hacer un análisis de impacto de diferentes incentivos monetarios comprendidos en un plan de beneficios tributarios para trabajadores adultos mayores en Irlanda. También construyeron un modelo para predecir las decisiones de jubilación de trabajadores con base en la situación de su hogar. Se considera que la decisión de retiro de los empleados no depende solamente de su situación personal, sino que se ve influenciada por las condiciones familiares, incluyendo los ingresos de todos los miembros de la familia que viven juntos. Usando el modelo se analiza un plan de reforma pensional para cambiar la edad mínima a la cual los mayores tienen derecho a una pensión del Estado.

Canova, Piccoli y Spadaro (Canova et al., 2015) utilizaron un modelo combinado micro-macro simulación para evaluar el impacto de la introducción de un programa de bienestar del Estado, el *Revenu de Solidarité Active* (RSA), para remplazar un programa anterior, basado en valores mínimos de indicadores socio económicos. A partir de la simulación se cuantifican los efectos del programa sobre los aspectos económicos a nivel de hogar y se evalúan indicadores micro y macroeconómicos. Las simulaciones mostraron que, aunque el gasto público aumentaba con el nuevo programa, los efectos adicionales esperados: reducción de desempleo voluntario, aumento en la oferta de mano de obra y en el consumo, además de reducciones en pobreza y desigualdad, justifican ampliamente el programa.

Zucchelli et al. (Zucchelli et al., 2012) describen un modelo de microsimulación para evaluar los efectos de políticas alternativas de salud pública y de atención médica. Muestran cómo es posible incluir submodelos específicos para enfermedades determinadas y modelos de riesgo. También discuten algunas de las limitaciones del modelo.

Leite et al. (Leite et al., 2011) llevaron a cabo una comparación entre los impactos estimados por medio de modelos de microsimulación de programas de transferencias condicionales de dinero, con los valores realmente medidos (*ex post*) en experimentos aleatorizados realizados en México (programa PROGRESA) y Ecuador. El resultado muestra que los valores predichos *ex ante* mediante la microsimulación aproximan con precisión razonable los obtenidos *ex post* mediante métodos experimentales y cuasi experimentales. Por lo general el modelo de microsimulación subestimó los impactos, pero la diferencia no es estadísticamente significativa al nivel de significancia de 5 %.

Finalmente, vale la pena mencionar la extensa referencia editada por Bourguignon (Bourguignon, 2003), donde se presenta un panorama de las técnicas de simulación, tanto macro como micro, en el estudio de las desigualdades en la distribución de ingresos. Se presentan descripciones de las limitaciones, ventajas y desventajas de los métodos de simulación en estudios económicos.

### 4.2.2 Modelos basados en agentes

Los modelos económicos, tanto globales como los de microsimulación, están basados de una u otra manera en modelos de equilibrio general que describen la forma como los individuos que componen un sistema económico toman decisiones para maximizar su beneficio, en el contexto de unas condiciones de mercado perfecto. Sin embargo, cuando existen distorsiones que hacen inválidas estas condiciones, es mucho más difícil evaluar el efecto de programas o políticas. También se presentan dificultades para analizar y aun para simular los comportamientos adaptativos de los individuos a medida que aprenden a reconocer las condiciones del mercado y adaptan sus comportamientos con base en percepciones de efectos directos e indirectos.

Un enfoque alternativo, aparecido en forma independiente en varias áreas del saber (ecología, computadores, logística, etc.), es el denominado Modelos Basados en Agentes o ABM por su sigla en inglés (“*agent based models*”). Los modelos basados en agentes son modelos de simulación, intensivos en computación, en los cuales se simulan comportamientos individuales, de una población determinada, a través de **agentes**. Éstos son entidades independientes representadas en la simulación por medio de reglas o funciones de decisión. Las reglas de decisión pueden ser desde expresiones lógicas o probabilísticas muy simples hasta modelos adaptativos basados en Inteligencia Artificial. Algunas condiciones adaptativas se limitan a la formulación de algoritmos que permiten ajustar las reglas de decisión, con base en condiciones, tanto individuales como en respuesta a la política o a la respuesta global de la población. Los agentes, además están localizados geográficamente, si es del caso, lo cual permite tener en cuenta las heterogeneidades tanto individuales como espaciales. Los agentes pueden comunicarse a través de mecanismos previstos en el ambiente donde se desarrolla la dinámica. Adicionalmente, es posible prever la existencia de subsistemas que ejecutan funciones de coordinación.

Los modelos basados en agentes han sido empleados recientemente para simular la respuesta de una población (donde los agentes son individuos, universidades, empresas, etc. que constituyen la población), ante una política o programa que modifica sus condiciones desde el punto de vista económico. En muchos sentidos los ABM constituyen una generalización de los modelos de microsimulación. Su uso en evaluaciones de impacto, sin embargo, ha sido mucho menos frecuente que el de aquellos.

Filipski y Taylor (Filipski and Taylor, 2012) emplearon un modelo basado en agentes para estudiar el impacto de políticas de subsidios a los ingresos de población rural en Ghana y Malawi. Se estudiaron dos alternativas: pagos directos a los pobladores y un mecanismo alterno de subsidios tanto en insumos como en producción o en forma de bienestar. En este estudio, se calibró el modelo a las condiciones de producción de cada

país. A continuación se usó el modelo para evaluar la conveniencia de cada uno de los esquemas. A pesar de la creencia generalizada de que los subsidios directos en dinero son el mecanismo más efectivo, los investigadores hallaron que ningún esquema es siempre óptimo independientemente de las condiciones locales. También se encontró que mecanismos como los subsidios a los insumos o precios de sustentación podrían ser los más eficientes, dependiendo del tamaño del mercado y de la estructura del sistema de distribución.

C. Sahrbacher *et al.* (Sahrbacher *et al.*, 2012), (Sahrbacher *et al.*, 2014) crearon el modelo AgriPolis para evaluar los cambios estructurales en la agricultura de una región, los cuales se pueden presentar como resultado de políticas agrícolas. Cada granja decide qué producir y en qué cantidad, decide si vale la pena arrendar terrenos para producción adicional o si debe comprar o vender parte de su terreno. Este modelo se desarrolló para aprovechar datos de censos y encuestas agropecuarias para crear una población sintética con características similares a la que realmente existe en cada región. El modelo ha sido utilizado para evaluar posibles impactos de políticas en 22 regiones de 11 países de la Unión Europea. Graupner (Graupner *et al.*, 2011) desarrolló un modelo de competencia espacial para usar en agricultura, el “*Spatial Agent-based Competition Model*” y lo utilizó para evaluar el impacto de estructuras de mercado en la producción de leche en Alemania.

S. Monroy (Monroy and Diaz, 2017), por su parte, utilizó un modelo basado en agentes para hacer la evaluación de impacto de un programa de transferencias condicionales de dinero en el programa Bolça Escola de Brasil e hizo una comparación con una evaluación realizada anteriormente por medio de otras metodologías.

Aunque no está directamente asociada con la evaluación de decisiones de financiación, es notorio el trabajo de Campos *et al.* (Campos *et al.*, 2013), en el cual se utilizó un modelo ABM para analizar la dinámica de la evolución de las redes de colaboración en el trabajo investigativo comparando diferentes estrategias de colaboración entre firmas. Un resultado interesante de este trabajo fue que, en las condiciones previstas en el modelo, la estrategia basada en concentración (“*clustering*”) proveía las mejores condiciones desde el punto de vista económico y también para difundir el conocimiento en la red.

### 4.2.3 Modelos basados en opciones financieras

Una alternativa para evaluar el impacto de proyectos de investigación individuales que es completamente diferente de casi todos los demás métodos, es la denominada **Opciones reales**. Esta ha sido utilizada en la industria farmacéutica y en agricultura para decidir acerca de la financiación de proyectos individuales de I+D. Trang *et al.* (Trang *et al.*, 2002), por ejemplo, presenta una crítica de la valoración Costo Beneficio mediante el Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto de investigación. Usando un VPN para valorar los beneficios de un proyecto caracterizado por alta incertidumbre suele resultar en una subvaloración del mismo, con respecto a un proyecto menos incierto. No obstante, los resultados no determinísticos muchas veces están asociados con la posibilidad de tomar decisiones intermedias, contingentes con el avance del trabajo.

En general, para la valoración de un proyecto, se deben considerar dos tipos de incertidumbre. En primer lugar, las de tipo tecnológico que pretenden cuantificar el riesgo

técnico asociado con los diferentes resultados (éxito o fracaso, por ejemplo) del proyecto de investigación en cada etapa. La gestión de la investigación debería actuar ante las consecuencias de los eventos, en lugar de tomar decisiones inflexibles para tratar de controlar los riesgos. En segundo lugar, se consideran las incertidumbres debidas a las posibles decisiones futuras que deben ser tomadas en el tiempo. Esto, en realidad introduce una especie de incertidumbre favorable o buena proveniente de la flexibilidad adicional que las decisiones intermedias ofrecen para el proyecto y que el VPN no puede considerar.

En el contexto de este enfoque, las flexibilidades se conocen como **opciones reales**, por analogía con las opciones financieras. La valoración de un proyecto debería entonces considerar el valor de esas flexibilidades usando la teoría de opciones reales. Por consiguiente, si hay más flexibilidad, hay más posibilidades de cambiar de rumbo en caso de que los resultados no sean los esperados. Resulta, entonces, posible invertir en un proyecto con alta incertidumbre, puesto que si las primeras etapas no son satisfactorias, no es necesario continuar con el proyecto. Si el proyecto tiene esa flexibilidad, puede ser suspendido o ajustado en cualquier etapa, lo cual significa que la flexibilidad tiene un valor económico que debe ser incluido en los análisis.

En este contexto, para evaluar el valor de la flexibilidad se utiliza un enfoque basado en la teoría de *opciones financieras*. Una *opción real*, en este contexto, es el derecho (no la obligación) de adquirir un bien (que en el caso de proyectos de I+D puede ser la utilidad del proyecto), pagando una cierta suma (precio de ejercicio, correspondiente al precio de la inversión) en un tiempo futuro limitado por una fecha (fecha de ejercicio o de madurez). Si el comprador de la opción decide comprar el bien (hacer la inversión), se dice que *ejerce la opción*. La valoración de la opción es el precio que debería pagar por adquirir el derecho. Esto equivale al valor de la flexibilidad adicional.

Nótese que en cualquier momento, hasta la fecha de ejercicio, el tomador puede decidir si adquiere el bien o no, de acuerdo con las condiciones del mercado en ese momento. Esta es la razón por la cual la opción da una flexibilidad adicional.

En el caso de financiación de proyectos de I+D, en cada etapa se consideran varios tipos de opciones: **diferir** la inversión hasta ver si el mercado la justifica; **abandonar o no** el desarrollo; y también existe la opción de **contraer o expandir** el proyecto.

El método requiere la evaluación de todas las probabilidades de todos los posibles resultados de la investigación. Estas probabilidades suelen ser estimadas por los mismos investigadores y esto puede ser una fuente grande de error.

Andoseh *et al.* (Andoseh *et al.*, 2014) ha utilizado esta teoría de opciones financieras para evaluar, *ex ante* la financiación de proyectos de investigación agrícola.

#### 4.2.4 Modelos macro económicos

Los modelos macro económicos intentan representar la operación de la economía de una región o país, en condiciones de equilibrio. Por su carácter macro, representan los diferentes sectores de la economía en forma agregada. Por lo tanto, la demanda y la oferta de bienes y servicios, el uso de los recursos productivos y los precios se consideran únicamente como variables agregadas que, de alguna manera, son el promedio (o la integral) de los valores

individuales o locales; y estos pueden variar ampliamente. Sin embargo, se supone que las fluctuaciones no afectan las conclusiones a nivel global. Generalmente, los parámetros del modelo se identifican a partir de datos agregados (macro económicos).

A continuación, haremos un breve resumen de las características de varios tipos de estos modelos. Nuestra descripción está basada en el estudio comparativo de Di Comite y Kancs (Di Comite et al., 2015).

El primer tipo de modelo de equilibrio es el denominado **Modelo Macro Econométrico**, el cual establece balances y relaciones entre las variables, cuyos parámetros se obtienen mediante el análisis de conjuntos o series de datos extensas. El equilibrio macro-económico se alcanza cuando las diferentes relaciones y restricciones del modelo son satisfechas. A partir de la información histórica disponible, es posible calibrar las relaciones y ecuaciones que caracterizan el estado de la economía.

Cuando se aplican al análisis del impacto de las inversiones en ciencia y tecnología, los modelos que han sido utilizados suelen tener módulos para representar una estructura orientada a la demanda. generalmente los modelos tienen la posibilidad de permitir capacidades productivas subutilizadas (lo cual viola las condiciones de equilibrio) mediante la relajación de algunas restricciones. Un tipo de modelo macro-económico que ha sido usado explícitamente para la evaluación *ex ante* de programas de financiación es el modelo Némesis (Brécard et al., 2006), (Zagamé et al., 2010). Este modelo ha sido utilizado para la evaluación del séptimo Programa Marco de la Unión Europea, como se explicará en más detalle en la sección siguiente.

Un tipo de modelos ligeramente diferente es el llamado **Equilibrio General Computable – SEGC**. En este tipo de modelos, los mercados se consideran siempre en equilibrio, balanceando la oferta y la demanda a través del sistema de fijación de precios. De esta manera, es posible analizar cómo podría reaccionar la economía ante un cambio de política o de tecnología u otros factores que hagan salir del equilibrio. Para estudiar el efecto de cambios de política, es posible simular el efecto de *shocks* que pueden llevar al sistema a un nuevo equilibrio.

Los modelos de **Equilibrio General Computable Espacial – EGCE** utilizan la misma idea del SEGC, pero introducen una representación un poco más desagregada; por ejemplo de economías regionales. Esto requiere, además, un modelo de las conexiones entre economías regionales, a través de intercambios comerciales, de bienes y servicios, movilidad de los factores y, especialmente, de *spillovers* de conocimiento. Un ejemplo de este tipo de modelos es el llamado RHOMOLO (Di Comite et al., 2015), (Brandsma and Kancs, 2015), que fue usado para hacer la evaluación de los efectos de políticas regionales en la Unión Europea.

Por último, los **modelos dinámicos de Equilibrio General Estocástico** están basados en los modelos de equilibrio general tales como los de Equilibrio General Computable, con ecuaciones estructurales y de balance que caracterizan el equilibrio. Sin embargo, también usan mecanismos para definir reglas de decisión en forma explícita, que satisfacen restricciones tecnológicas, institucionales y presupuestales. Es frecuente que se incluyan mecanismos para prever las consecuencias futuras de eventos recientes, lo cual les confiere también propiedades dinámicas y facilita la optimización de políticas en for-

ma *ex ante*. Un ejemplo de esta categoría de modelos es el denominado QUEST (Romer, 1990), (Lee, 1995), (Di Comite et al., 2015), que ha sido utilizado para evaluar el efecto de inversiones en I+D a nivel nacional, pero sin distinguir entre inversión pública y privada.

#### 4.2.5 Evaluación *ex ante* de programas de investigación

La experiencia de la Comisión Europea en evaluaciones de impacto es significativa aunque ésta ha sido principalmente en evaluaciones *ex post*, las cuales viene realizando desde 1990. En el año 2001, por el interés de mejorar la calidad de las propuestas de política y simplificar la regulación surge la evaluación de impacto regulatoria<sup>1</sup> y la evaluación de impacto *ex ante*. En el año 2005 la Comisión desarrolló su primera evaluación de impacto *ex ante* del séptimo programa marco – FP7<sup>2</sup>, programa que financió la investigación y el desarrollo tecnológico en Europa durante el periodo 2007 a 2013 con un presupuesto de 50 billones de euros (Delanghe and Muldur, 2007).

Según el reporte de competitividad de la (Comisión Europea, 2004a) la Comisión se ha preocupado, además del tema regulatorio, por la gobernanza y el desarrollo sostenible. Bajo esta perspectiva diagnóstico que la calidad de las evaluaciones de impacto se debe incrementar a través de un análisis integrado de los diferentes impactos (económicos, sociales y ambientales), una mejor cuantificación y monetización de los impactos, una mejor estimación de los requerimientos administrativos y una consideración de diferentes horizontes de tiempo. (European Commission, 2004b)

El séptimo programa marco se centró principalmente en cuatro componentes: ideas, capacidades, recursos humanos y cooperación. La evaluación de impacto *ex ante* incluyó una primera parte de revisión de literatura sobre el rol que la ciencia y la tecnología (el FP) podría jugar en orientar los cambios que Europa está enfrentando, tales como: alto desempleo, bajo crecimiento económico, menor competitividad, pobreza, inequidad regional, entre otras. A su vez, se realizó un análisis de los indicadores de ciencia y tecnología. La evaluación *ex ante* incluyó una segunda parte enfocada a los posibles impactos del 7FP teniendo en cuenta la experiencia de los seis programas marco anteriores implementados en un periodo de 20 años, lo cual adelantó a través de las evaluaciones *ex post* realizadas a los mismos.

Esta primera evaluación de impacto *ex ante* se desarrolló siguiendo la guía que diseñó la Comisión para el desarrollo de este tipo de estudios y, en la primera parte, concluyó que hubo valor agregado para la investigación europea promoviendo el apalancamiento de recursos privados, el desarrollo de grandes proyectos conjuntos que construyeron masa crítica, el acceso a infraestructura de investigación a gran escala, el fomento al desarrollo de capacidades de talento humano a través de entrenamiento, movilidad y participación en redes. Este valor agregado permitió una mayor integración de la I+D europea. En la segunda parte de la evaluación *ex ante* se desarrollaron diferentes escenarios de política, se evaluaron sus impactos macro económicos y se diseñó un modelo econométrico con el fin de definir los posibles impactos del FP7.

---

<sup>1</sup>RIA: Regulatory Impact Assessment

<sup>2</sup>7th Framework Programme

A partir de lo anterior, se concluyó que el gran presupuesto destinado a investigación colaborativa atrajo una mayor participación de las firmas, las universidades y los institutos de investigación de varias regiones y Estados miembros generando redes de investigación colaborativa y proyectos conjuntos de alta calidad investigativa lo cual creó mejores habilidades para competir. Por lo tanto tuvo un gran impacto en el rendimiento científico, tecnológico e innovador de Europa, lo cual se evidenció en el incremento de publicaciones científicas colaborativas entre autores europeos y en la generación de patentes. De otra parte, las firmas, como resultado de su participación en proyectos de investigación colaborativa, percibieron que podían mejorar su productividad, tener acceso a nuevos mercados, mejorar su reputación e imagen y lograr una mayor competitividad (Delanghe and Muldur, 2007).

La evaluación de impacto *ex ante* del 7FP utilizó Némesis, un modelo matemático de equilibrio general, para evaluar los impactos a nivel macro económico. La Comisión analizó el tamaño, la estructura y el contenido del 7FP, utilizó los resultados de la evaluaciones *ex post* de los programas anteriores, desarrolló un ejercicio de modelamiento econométrico y construyó diferentes escenarios de política. Con esta experiencia la Comisión Europea considera que las metodologías para evaluación de impacto de programas de fomento público para investigación y desarrollo deberían estandarizarse en los Estados miembros. A su vez, se requiere un mayor esfuerzo en recoger datos útiles y un refinamiento en las metodologías de evaluación explorando estudios bibliométricos y encuestas de innovación (European Commission, 2005).

Holbrook y Frodeman (Holbrook and Frodeman, 2011) hicieron un estudio acerca de la capacidad de los científicos para evaluar el impacto *ex ante*, de los proyectos de investigación mediante el proceso estándar de revisión por pares. A través del análisis de las evaluaciones *ex ante* de proyectos y programas financiados por la “National Science Foundation” de los estados Unidos y los evaluados por la Unión Europea a través de su 7º Programa Marco FP7, como se mencionó anteriormente. Se encontró que las evaluaciones por pares eran bastante adecuadas para juzgar el valor del trabajo científico y su contribución a la ciencia. Sin embargo, la evaluación que hicieron los científicos e investigadores del impacto de los proyectos de investigación a la sociedad en general fue mucho menos acertada. Aparentemente, los investigadores no estaban muy interesados en siquiera intentar evaluar el impacto social de los proyectos.

### 4.3 Comparación de metodologías

Las metodologías de evaluación de impacto son diversas, heterogéneas y dependen de cuál es el objetivo de la evaluación y del contexto en el que se desarrollan. Podríamos decir que no existe una metodología excepcionalmente buena; todas tienen sus ventajas y desventajas. La caracterización de impactos puede variar sustancialmente si estamos tratando de incluir efectos directos e indirectos de mediano y largo plazo.

Tradicionalmente, la evaluación de los resultados de investigación se realizaba desde el punto de vista científico medidos en número de publicaciones o patentes. Actualmente hay

una tendencia a combinar el enfoque cuantitativo con el cualitativo y hacer evaluaciones más ricas en contenido y resultados. Otra tendencia es completar las evaluaciones de impacto con metodologías complementarias como el análisis de expertos y hacer que éstas sirvan de retroalimentación para un proceso continuo de seguimiento a las actividades científicas y tecnológicas.

En general, la evaluación de impacto busca estimar los efectos de invertir una cierta cantidad de recursos en un programa social dado. Los impactos se miden en términos de una o más variables de resultado que cuantifican los logros deseables del programa. Sea  $y$  una variable cuyos valores miden un efecto del programa siendo evaluado. En el caso de programas de investigación logros deseables podrían ser medidos mediante, por ejemplo, el número de patentes o publicaciones científicas resultantes de una investigación financiada por el gobierno. En un programa social que otorga transferencias condicionadas de dinero a familias pobres, siempre y cuando éstas envíen sus hijos al colegio, un resultado podría ser el porcentaje de niños que asisten a la escuela. A menudo, los resultados son multidimensionales y podría ser necesario utilizar varias variables para caracterizar los resultados.

La evaluación de impacto está íntimamente asociada con el diseño de políticas públicas. En la sociedad contemporánea es indispensable hacer una estimación de los efectos de un programa para facilitar la toma de decisiones, para asignar eficientemente los recursos, para evaluar responsabilidades y para redirigir las políticas públicas, cuando sea necesario. Existe una tendencia creciente a nivel mundial para efectuar un diseño de políticas públicas basado en la evidencia. Esto ha generado considerable interés en el desarrollo de metodologías de evaluación de impacto que permitan aplicar un conjunto de herramientas cualitativas y cuantitativas para verificar la calidad y efectividad de las intervenciones. Todo, enfocado en la generación de evidencias sólidas acerca de los resultados para propiciar el apoyo de los programas, por parte del público (Sutcliffe et al., 2006).

Es de anotar que, independientemente de la metodología que se utilice, un aspecto fundamental es contar con la información del programa y el tipo de datos requeridos ya que de la calidad de la información dependerá la calidad de la evaluación. Es indispensable conocer la estructura, objetivos, procesos de ejecución, forma de asignación de los recursos y beneficiarios del programa con el fin de poder definir el alcance de la evaluación y los indicadores de medición.

También cabe anotar que las metodologías de evaluación de impacto de programas de inversión social no necesariamente son aplicables a programas de investigación debido a diversas razones tales como:

1. El proceso de conocimiento es acumulativo. Los resultados futuros dependen de los resultados del presente y el pasado. Esto significa que no se puede garantizar la independencia de la variable de resultado a lo largo del tiempo sino que hay auto-correlaciones que es necesario considerar.
2. Los resultados se dan en el largo plazo. La investigación básica tiene incertidumbres y no siempre se logra el resultado deseado en el momento requerido. Generalmente la creación de conocimiento nuevo se da después del desarrollo de varias investigaciones.

3. La forma de asignación de los recursos de investigación. Las agencias financiadoras de proyectos de investigación tradicionalmente otorgan los recursos por convocatoria a las mejores propuestas presentadas. Esta razón excluye a priori, todas las metodologías basadas en técnicas de selección aleatoria.
4. No siempre se cuenta con una línea de base; es decir, con la medición inicial de los indicadores al momento de implementar el programa diseñado. Esto implica que no hay un punto de referencia para realizar comparaciones posteriores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, a continuación se presentará un panorama general de las metodologías de evaluación de programas y proyectos de investigación. Esta sección se basa principalmente en la amplia revisión de metodologías por parte de Ruegg y Jordan (Ruegg and Jordan, 2007), y en el trabajo de Kanninen y Lemola (Kanninen and Lemola, 2006). Posteriormente, se hará una comparación de las metodologías de evaluación de impacto *ex ante*.

#### 1. Evaluación por pares

La evaluación por pares está basada en el juicio de uno o varios expertos en el campo científico respectivo y puede ser utilizada para responder un conjunto de preguntas acerca del desempeño de un programa, de acuerdo con unos criterios previamente establecidos. El proceso de selección de los expertos es un factor clave pues la calidad y credibilidad del evaluador par es fundamental para la eficacia del proceso de evaluación. Es una metodología internacionalmente conocida, utilizada por muchas agencias de financiación de la investigación. Además, es de bajo costo y rápida aplicación. En ocasiones la metodología de evaluación por pares ha conducido a la conformación de paneles de expertos con el fin de evaluar la relevancia y pertinencia de la investigación para usuarios potenciales y para la sociedad. Es utilizada, por ejemplo, para la selección de proyectos que van a ser financiados, para apoyar decisiones de planeación estratégica, para evaluar proyectos en ejecución, para evaluar la calidad científica de investigaciones ya terminadas o para la revisión de artículos para su publicación, entre otros. Es de anotar que cuando esta metodología se utiliza para evaluar impactos de investigación, generalmente es complementada con otras metodologías que provean información adicional como impactos sociales y económicos.

#### 2. Métodos bibliométricos

Los métodos bibliométricos se refieren a un conjunto de técnicas que utilizan datos de publicaciones y patentes para observar patrones de influencia de los esfuerzos de investigación. Muestran el conocimiento que ha sido creado y diseminado así como la emergencia de nuevas ideas y el desarrollo de relaciones y redes. Estos métodos incluyen conteo de publicaciones, análisis de citas, minería de datos de material de texto, etc. Los estudios bibliométricos utilizan diferentes niveles de agregación: a nivel macro, consolidan información de países; a nivel meso, agregan la información por regiones, instituciones y áreas de conocimiento, entre otros; a

nivel micro, asocian información de secciones o subsecciones de áreas, de grupos de investigación y de investigadores o individuos. Estos estudios permiten caracterizar la actividad científica y tecnológica, analizar la relación entre la financiación y la calidad de la investigación y revisar influencias entre distintas disciplinas.

Una de las fuertes limitaciones de estos métodos es que solo realizan conteos, es decir, no distinguen diferencias en calidad ni en propósito. Sin embargo, en análisis de publicaciones diversos esquemas han sido utilizados para controlar las diferencias en calidad de los *journals*. Utilizan indicadores de ciencia y tecnología para analizar la investigación y desarrollo, pero éstos tienen un mayor énfasis en las entradas y salidas del proceso de investigación que en los impactos generados en aspectos científicos, sociales y culturales.

### 3. Encuestas

El método de encuesta es utilizado para reunir información obtenida directamente de un grupo de individuos acerca de sus ideas, opiniones, actitudes, creencias, preferencias, preocupaciones, experiencias o cualquier otro aspecto. Las respuestas a las preguntas pueden ser expresadas en términos estadísticos con el fin de caracterizar un programa, analizar su avance, evaluar la satisfacción del usuario, analizar los *stakeholders* y aprender acerca de los efectos de un programa. Entre las ventajas de este método está su adaptabilidad al contexto y a los problemas de investigación específicos. De igual forma, permite obtener información cualitativa y cuantitativa y orientar los estados del proceso a través del cual los impactos se materializan. Una de las limitaciones es la cantidad de respuestas que se obtienen, puesto que cuando éstas son muy pocas puede limitar la confiabilidad de los resultados y por lo tanto puede requerir pasos adicionales con el fin de lograr incrementar el número de respuestas. Un factor clave es el diseño de la encuesta, según su objetivo, y la adecuada formulación de las preguntas para no sesgar a la población objetivo de la misma.

### 4. Métodos econométricos

Los métodos econométricos utilizan herramientas matemáticas, estadísticas y modelos teóricos para analizar y medir relaciones funcionales y económicas de un programa o programas. Algunos de los modelos que han sido desarrollados se han refinado para su aplicación repetitiva, para mostrar relaciones causa efecto y predecir comportamientos futuros.

Tradicionalmente, los estudios econométricos inician con la formulación de hipótesis con el fin de validarla o con la formulación de una pregunta tipo causa-efecto, con el fin de responderla. Estos métodos son frecuentemente utilizados para estimar los impactos de un programa o evaluar la efectividad de una política pública. Normalmente se realiza un análisis descriptivo de variables y de sus correlaciones con el fin de poder estimar los parámetros de la población estudiada. En general, los modelos econométricos se utilizan para realizar análisis estructural, predecir valores futuros

de las variables, simular valores óptimos de las variables instrumentales de un evento o fenómeno económico. Estos métodos requieren un gran esfuerzo en la obtención de los datos, debido a que es una labor costosa y que consume bastante tiempo en su implementación.

#### 5. Estudios de caso

Los estudios de caso usan narrativas soportadas en datos para explorar, describir y explicar fenómenos. Los estudios de caso son una metodología común para evaluar los impactos de investigación basados en información más cualitativa. Estos estudios apoyan la descripción del programa, cómo trabaja y cuáles relaciones se dan entre los interesados. Además, son particularmente ventajosos cuando la información de los impactos es muy pobre. Se utilizan para responder preguntas asociadas a: ¿qué?, ¿cómo? y ¿por qué?. Proveen ejemplos ilustrativos de cómo funciona un programa y ayudan a los tomadores de decisiones a diseñar o rediseñar sus programas, a reasignar los fondos de financiación o a asignar nuevos fondos.

#### 6. Análisis de redes

El análisis de redes es un método de mapeo visual que permite medir las relaciones entre investigadores, grupos de investigación, laboratorios y otras organizaciones. Es útil para evaluar los impactos de un programa en términos de colaboraciones e influencias. También muestran cómo el conocimiento (particularmente el conocimiento tácito) es diseminado a través de una variedad de flujos de comunicación.

El análisis de redes es útil también para evaluar programas de investigación y desarrollo, debido a que permite identificar rutas de interacciones con ideas, conocimiento e información entre los participantes, influyendo en la naturaleza, cantidad, calidad y velocidad de la investigación o de la innovación.

Este análisis es coherente con la idea de que la ciencia es una actividad social desarrollada colectivamente por comunidades de práctica. Estas comunidades ó grupos sociales se constituyen con el fin de generar conocimiento especializado compartiendo aprendizajes basados en sus experiencias prácticas. La forma, el tamaño y la densidad de la red pueden servir como indicadores de la fortaleza de las comunidades de práctica, de los roles y relaciones entre los miembros de la red.

Entre las limitaciones de este método está que el diagrama de la red muestra la dinámica de las relaciones para un tiempo específico, así que es necesario repetir el proceso en un intervalo de tiempo posterior con el fin de visualizar los cambios en la red a través del tiempo. El análisis de red puede mostrar la cantidad de colaboraciones y sugerir la importancia relativa de un programa de I+D; sin embargo, no provee una medida cuantitativa de su valor.

#### 7. Trazabilidad histórica

Este método permite rastrear cronológicamente una serie de eventos interrelacionados. Ha sido utilizado, con éxito, en el área de logística para entender cómo se mueve un producto a través de su cadena de suministro.

En materia de investigación este método se ha utilizado para rastrear la trayectoria histórica y examinar mecanismos clave, instituciones, actividades y procesos que parecen tener un rol fundamental en el desarrollo de una innovación. Una innovación se da generalmente como resultado de una serie de esfuerzos de individuos, instituciones y avances del conocimiento que ocurren a través del tiempo hasta que se logra la innovación. Por lo tanto, se requiere que transcurra un tiempo considerable para poder hacer el rastreo y establecer la historia del objeto estudiado. En este tipo de estudios es muy difícil establecer relaciones causa-efecto.

Con respecto a las metodologías de evaluación *ex ante* se presentan varias clasificaciones de metodologías, solamente con el fin de contextualizar al lector y poder posteriormente comparar cuatro metodologías específicas: microsimulación, modelos basados en agentes, análisis de series de tiempo y modelos macro económicos.

Una de las clasificaciones más conocida de los métodos de evaluación de impacto *ex ante* es la utilizada en la Cepal para evaluar programas sociales antes de su implementación con el fin de decidir cuál de ellos poner en marcha (Cohen and Martínez, 2002). Esta clasificación incluye dos metodologías de evaluación: Análisis Costo Impacto de Alternativas y Análisis Multicriterio.

El **Análisis Costo Impacto de Alternativas** generalmente se utiliza cuando tenemos un gran programa con uno ó mas objetivos y diversas alternativas de intervención, mientras que el **Análisis Multicriterio** se usa cuando tenemos distintos proyectos que compiten por recursos. En estas metodologías se analizan las características del programa, el objetivo de la evaluación, el tipo de información disponible y se establecen varios requisitos para su realización:

1. Objetivos de impacto claros
2. Criterios de formulación predefinidos
3. Indicadores estándar
4. Población objetivo equivalente
5. Horizonte de comparación único
6. Existencia de una línea de base del problema
7. Análisis de Oferta y demanda
8. Análisis de costos
9. Estimaciones de los impactos

En estas metodologías se comparan los beneficios e impactos con los costos monetarios durante un periodo de tiempo determinado con el fin de saber si los impactos del programa se obtienen a un costo razonable o cuál de los programas es el más eficiente.

Esta metodología para evaluar impactos es difícil de aplicar en el caso de proyectos de I+D debido a que en éstos los impactos pueden ser multidimensionales y su valoración, en términos monetarios, puede ser muy complicada o incluir factores subjetivos. También es frecuente la carencia de información para construir una línea de base o para hacer comparaciones en horizontes de tiempo coherentes.

Otra clasificación de metodologías de evaluación *ex ante* son los métodos cuasi experimentales, los cuales contrastan hipótesis causales e identifican un grupo de comparación lo más parecido posible al grupo de tratamiento en cuanto a las características del estudio de base (programa o intervención). El grupo de comparación capta los resultados que se habrían obtenido si el programa no se hubiera aplicado. Por consiguiente, se puede establecer si el programa ha causado alguna diferencia entre los resultados del grupo de tratamiento y los del grupo de comparación. Estos métodos se utilizan más a menudo cuando no es posible asignar de manera aleatoria los individuos a los grupos de tratamiento y los grupos de control. Generalmente se estima la probabilidad de que el individuo participe en la intervención dadas sus características observables. Este es el caso de la financiación de proyectos de investigación a través de una convocatoria. Es claro que no se puede seleccionar aleatoriamente el proyecto sino que dependerá, por ejemplo, de la calidad de la propuesta de investigación. Entre las técnicas utilizadas están las siguientes (White et al., 2016) :

### 1. Emparejamiento

Esta técnica busca encontrar, para cada individuo en el programa (grupo de tratamiento), otro “idéntico” (un clon), excepto por la participación en el programa (grupo de Control). Supone que la probabilidad de ser beneficiario del programa depende completamente de características observadas del individuo.

### 2. Variables Instrumentales

Esta técnica supone que existe una variable instrumental que está asociada con participar o no participar<sup>3</sup> en el programa pero que esa variable no tenga nada que ver con la variable de resultado utilizada. En una primera etapa se predice la participación en el programa que se debe exclusivamente a la variable instrumental. En la segunda etapa se utiliza esa predicción para medir el cambio en la variable de resultado que se debe a esa porción exógena de la participación en el programa.

### 3. Regresión discontinua

Esta técnica puede utilizarse cuando los individuos que participan en el programa que se evalúa deben cumplir un criterio previo, conocido como umbral o punto de corte. El umbral determina la idoneidad de participación en el programa y generalmente se basa en una variable **continua** que se evalúa en todos los individuos potencialmente aptos para participar. Por ejemplo, los estudiantes cuya calificación

---

<sup>3</sup>Para el caso de proyectos de investigación, la participación en el programa significa que recibe financiación en la convocatoria.

en la prueba de ingreso a la universidad es inferior a 800 se inscriben en un programa de nivelación de matemáticas. Para esos casos, es necesario contar con datos sobre la variable de selección y el indicador de resultado de todos los individuos considerados para el programa. Sin embargo, numerosos programas no conservan la información sobre los individuos no aceptados, lo cual puede dificultar el diseño de regresión discontinua.

#### 4. Diferencias en diferencias

Esta técnica estima el efecto del programa sobre la variable de resultado a partir de la comparación de los cambios ocurridos en el grupo de tratamiento y en el grupo de control antes y después de la aplicación del programa. Este enfoque se utiliza cuando la selección de participantes no es aleatoria y se sospecha que los grupos no son perfectamente comparables; requiere datos disponibles tanto para beneficiarios como para no beneficiarios del programa y se observan tanto antes de la intervención como después de la intervención.

Para mayor información de estas técnicas ver (Bernal and Peña, 2011), (White et al., 2016), (Gertler et al., 2011) y (Khandker et al., 2010).

Para el tipo de impactos que estamos considerando aquí, los “individuos” de interés podrían ser proyectos de investigación; en ese caso, los del grupo tratado serían los proyectos financiados y los del Grupo de Control serían los proyectos que fueron presentados pero no recibieron financiación. Ahora bien, es de suponer que los proyectos que recibieron financiación son, en general, de calidad diferente — mejores, presumiblemente — que los que no la recibieron. Por lo tanto, es necesario establecer otras formas de medición del impacto de la financiación de proyectos de I+D. Para este propósito se han desarrollado las técnicas, discutidas arriba, que tratan de reducir al máximo los efectos de la heterogeneidad. Sin embargo, en la mayoría de los casos, no es posible usar esas técnicas para proyectos de investigación como los que estamos interesados en analizar. Tal vez una de las pocas metodologías que podría tener en cuenta estas condiciones sería una basada en “diferencias en diferencias”. Sin embargo, éstas requieren conocer en detalle las condiciones iniciales o “línea de base”, lo cual no es cierto para la mayoría de los grupos de investigación considerados. También se requiere que las subpoblaciones sean homogéneas. Por otra parte, este método ha sido objeto de algunas críticas que cuestionan su confiabilidad y aplicabilidad, como se puede consultar en el trabajo de Mullainathan (Bertrand et al., 2004). Otra posibilidad para la estimación podría ser el uso de variables instrumentales. No obstante, a través del desarrollo de este trabajo, no hemos encontrado nada que indique que podría seleccionarse alguna variable adecuada.

En líneas generales podemos decir que los modelos usados hasta la fecha para estimar impactos caen en una de las siguientes categorías:

1. **Modelos estructurales** basados en métodos variacionales para encontrar soluciones óptimas. Entre éstos podría mencionarse a Hall (Hall et al., 1993) y Bond *et al.* (Bond et al., 2003).

2. Métodos basados en la estimación de **funciones de producción** para calcular la elasticidad precio de las inversiones en I&D. Éstos incluyen los de Mamuneas and Nadiri (Mamuneas and Nadiri, 1996) y Griffith (Griffith et al., 2004).
3. **Modelos estocásticos**. Utilizan modelos tobit o probit para estimar la probabilidad de tomar la decisión de invertir y la cantidad invertida, Un ejemplo de este tipo es Bond *et al.* (Bond et al., 2003).

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las metodologías de evaluación de impacto *ex ante*. Para cada una se presenta su objetivo; aspectos clave; clasificación que utilizan; ventajas y desventajas.

COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO EX ANTE					
METODOLOGÍA	OBJETIVO	ASPECTOS CLAVE	CLASIFICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Microsimulación</b>	Modelar eventos complejos de la vida real por medio de la simulación de las acciones y los efectos de los cambios de política sobre las unidades individuales.	Se representa la población objeto de estudio por una población sintética con características similares a la población real.  Incluye modelos de comportamiento a nivel individual	* Estáticos y Dinámicos * Discretos y Continuos * Abiertos o Cerrados * Basados en ecuaciones de comportamiento o en decisiones probabilísticas	Simplicidad en su uso  Permite una modelación detallada del sistema que se estudiará  Flexibilidad de las formas funcionales que pueden utilizarse.	Se requieren cantidades masivas de información  Los datos disponibles no siempre cubren el mismo período de tiempo y se hace necesario completar las series mediante algún mecanismo que conserve la integridad de la información
<b>Modelos Basados en Agentes</b>	Simular comportamientos individuales de una población determinada a través de Agentes que usan reglas de decisión. Son intensivos en computación. Las reglas de decisión pueden ser desde expresiones lógicas o probabilísticas muy simples hasta modelos adaptativos basados en Inteligencia Artificial.	Los agentes pueden comunicarse a través de mecanismos previstos en el ambiente donde se desarrolla la dinámica.  También utiliza una población sintética.	* Abstractos * Modelos de Rango Medio * Modelos empíricos	Permite tener en cuenta las heterogeneidades tanto individuales como espaciales.	Requiere validación del modelo: a) verificar que el código computacional funcione según las especificaciones y b) validar que el modelo represente adecuadamente al sistema real.  Difícil de replicar  Alta carga computacional
<b>Análisis de Series de Tiempo</b>	Inferir sobre el futuro con base en lo sucedido en el pasado.  Se requiere la eliminación de tendencias y estacionalidad en las series de tiempo.	Permite combinar diferentes técnicas para realizar un análisis integral.  Se requiere la eliminación de tendencias y estacionalidad en las series de tiempo.	Tiene diversas técnicas: * Análisis de intervención * Camios Estructurales * Modelos ARMAX * Modelos VAR	Enfoque basado en sistemas dinámicos. Tiene en cuenta la naturaleza del proceso de generación de conocimiento	Requiere información histórica extensa  Solamente resultados a nivel agregado
<b>Modelos Macro-Económicos</b>	Representar la operación de la economía de una región o país, en condiciones de equilibrio.	Los parámetros del modelo se identifican a partir de datos agregados.	* Modelo Macro-económico * Equilibrio General Computable * Equilibrio General Computable Espacial * Equilibrio General Estocástico	Tienen propiedades dinámicas y facilitan la optimización de políticas en forma <i>ex ante</i>	Los mercados se consideran siempre en equilibrio (estáticos)

Tabla 4.1: Comparación de metodologías de evaluación *ex ante*.

# Capítulo 5

## Análisis basado en series de tiempo

Las inversiones en investigación, a través de la financiación de proyectos llevan a una situación dinámica: un proyecto financiado puede producir efectos que aparecen posteriormente y que pueden persistir o desaparecer en el largo plazo. La situación más deseable, especialmente en países en desarrollo, es que dichos efectos y consecuencias se mantengan durante un período largo en cuyo caso, como consecuencia de la financiación del proyecto, el grupo de investigación que lo adelanta experimenta cambios de hábitos y comportamientos con efectos perdurables.

Puesto que estamos interesados en la evaluación de los resultados de la financiación de proyectos de investigación con fondos públicos o privados, el análisis se concentrará en aspectos que son relevantes en ese caso. En algunos estudios se han aplicado métodos estadísticos, basados en una prueba de hipótesis (prueba  $t$ ) para determinar si el valor promedio de  $y$  antes y después del programa de financiación son significativamente diferentes. Esto sin embargo, como ha señalado Enders (Enders, 2010) y como se ilustró en la figura 3.1, puede producir resultados muy inexactos. En efecto, la prueba  $t$  estándar se basa en la suposición de que los dos grupos, para los cuales los valores promedios de una variable de resultado se están comparando, han sido obtenidos de poblaciones estadísticamente independientes, con igual varianza. Sin embargo, en el caso de procesos de investigación, los resultados en el tiempo  $t$ , que llamaremos  $y_t$ , están correlacionados con los valores anteriores de  $y$ . Esta dependencia se denomina **correlación serial** o **autocorrelación** porque cuantifica la dependencia de una variable con los valores de la misma variable, pero en instantes diferentes. Para los procesos de investigación, caracterizados por secuencias de pasos conducentes a algún resultado, esto significa que la producción en un tiempo determinado normalmente depende fuertemente de la producción en otros momentos. En esas condiciones, es muy improbable que algún grupo de investigación cambie súbitamente su productividad científica. En consecuencia, la suposición de que observaciones realizadas en momentos disyuntos en el tiempo, pero adyacentes sean independientes no tiene ningún asidero. Las prácticas y procesos desarrollados antes de recibir la financiación de un proyecto siguen influenciando el trabajo, aun después de terminar el período de financiación. Esto, por supuesto, es un reconocimiento del hecho de que la producción científica, medida de la forma que sea, en número de publicaciones o invenciones

(cuantificada en número de patentes, por ejemplo), es realmente un proceso acumulativo. En dicho proceso, los desarrollos maduran y mejoran a través de un proceso sofisticado de ensayo y error que denominamos *método científico*. Todas estas consideraciones implican que cualquier método de evaluación de los efectos de la financiación, que no tenga en cuenta estos procesos dinámicos de mediano y largo plazo, puede producir resultados muy imprecisos.

El carácter dinámico de los procesos de investigación y la no simultaneidad de las causas y efectos requieren un punto de vista diferente del tradicional para el análisis de impactos en esta área. Es preciso aceptar que se trata de un sistema dinámico y que su naturaleza podría ser capturada de una forma más precisa como un sistema estocástico al cual le son aplicados estímulos exógenos, variables a lo largo del tiempo. Los resultados, claro está, son también variables en el tiempo. Por lo tanto, la cantidad de recursos otorgados para financiar las investigaciones a lo largo del tiempo y la consecuente variación en la producción científica serán consideradas como series de tiempo. De esta manera, se hace posible utilizar herramientas matemáticas y estadísticas apropiadas para cuantificar los efectos de la financiación sobre la productividad de los investigadores y sus equipos de investigación (grupos de investigación).

Por las razones expuestas anteriormente, se propone en este capítulo que el análisis de series de tiempo constituye un enfoque más apropiado, para el estudio de los efectos de los programas de financiación de la investigación, que cualquier método de evaluación estático. Esto se podría aplicar a políticas públicas de financiación, tanto a nivel local como regional y nacional o aun supranacional. A diferencia de la mayoría de los modelos comúnmente aplicados, el enfoque basado en sistemas dinámicos que estamos proponiendo en esta investigación permite estudiar características del proceso que serían imposibles de capturar utilizando un modelo estático.

Inspirados por varios trabajos de Enders *et al* ((Enders et al., 1992), (Enders et al., 1990), (Enders and Sandler, 1991)), sobre el análisis de políticas de control del terrorismo, tratamos de analizar los efectos de establecer políticas públicas acerca de la investigación científica y tecnológica, especialmente en lo concerniente a los programas orientados a proveer fondos para financiar proyectos de investigación. A su vez, se presentan algunas de las herramientas de análisis de series de tiempo, en relación con su aplicación a la evaluación de impactos de la financiación de investigaciones. En particular, se muestra el uso de modelos Auto Regresivos de Promedio Móvil (*AutoRegressive Moving Average* — ARIMA) y el *Análisis de intervención* para calcular medidas cuantitativas de los efectos de las políticas públicas con respecto a la investigación. De igual forma, se estudia cómo se puede analizar la posible existencia de cambios estructurales en los procesos subyacentes que determinan la producción científica de los investigadores.

El enfoque presentado en este capítulo será utilizado posteriormente, en el capítulo 7, para estudiar los efectos de la financiación de proyectos de investigación en malaria en Colombia.

En vista de las características dinámicas de la interacción entre las inversiones y la capacidad de investigación y la productividad de un conjunto de investigadores (el cual podría ser un grupo de investigación, o los investigadores de una región o país), es necesario

establecer cuáles herramientas de series de tiempo son las más adecuadas para su estudio. Por esa razón se presentarán a continuación ilustraciones de algunas herramientas estándar de la teoría, pero aplicadas a algunos problemas que surgen en la evaluación del impacto de las inversiones en programas de investigación. Algunas de las técnicas menos conocidas serán acompañadas de someras explicaciones. Sin embargo, el lector puede consultar una de las referencias siguientes (Hamilton, 1994), (McCleary et al., 1980), (Reinsel, 2003), para conocer los detalles, demostraciones y referencias adicionales.

En el resto de este capítulo, representamos por  $y_t$  el valor de una variable  $y$ , de interés, desde el punto de vista de los resultados de la financiación de un proyecto o programa de investigación, en el tiempo  $t$ . La variable  $y$  podría representar, por ejemplo, la producción científica de un grupo de investigadores, medida en términos de número de artículos publicados o en patentes otorgadas o cualquier otra medida de producción científica resultado de la investigación.

## 5.1 Preprocesamiento de los datos

Casi todas las pruebas estadísticas de hipótesis disponibles para el análisis de series de tiempo se basan en la noción de **estacionaridad**. Eso significa que la serie es el resultado de un **proceso estocástico estacionario (en sentido amplio)**. Por lo general, para garantizar la estacionaridad es suficiente asegurar que la media y la varianza de la distribución sean constantes en el tiempo, en cuyo caso hablamos de un proceso de **varianza estacionaria**. Para asegurar que se cumplen las condiciones requeridas que permitan usar las pruebas de hipótesis y las estimaciones estadísticas se requiere efectuar un proceso de preparación de los datos con el fin de garantizar que las series usadas sean estacionarias.

Prácticamente todos los procedimientos de estimación, con la posible excepción de los métodos de cointegración, deben estar precedidos de la eliminación de la tendencia de la serie, una operación que puede ser realizada mediante sustracción de la tendencia lineal o, más frecuentemente, por **diferenciación**; es decir, calcular los cambios ocurridos de un período al siguiente. Por lo tanto, cuando se tiene una serie temporal no estacionaria, se lleva a cabo un procedimiento de descomposición para extraer las componentes estacionarias antes de llevar a cabo cualquier proceso de modelado.

Para garantizar que las series son efectivamente estacionarias, existe una prueba de hipótesis muy utilizada. Se trata de la **prueba de Dickey Fuller aumentada**. Esta prueba determina la existencia de **raíces unitarias**. Es muy importante efectuar una prueba como esta, o alguna de las alternativas existentes (Hamilton, 1994), (McCleary et al., 1980), (Reinsel, 2003), antes de cualquier análisis.

## 5.2 Postprocesamiento de los datos

Una vez que se ha obtenido un modelo, algunas pruebas son necesarias para asegurar que los resultados sean adecuados para el propósito del análisis. Una condición que es necesaria en la mayoría de modelos dinámicos es la **estabilidad**, lo que significa que

los resultados de la predicción del modelo no **explotarán** en el tiempo. Otra condición importante es que los residuos de estimación en algún momento  $t_0$  no deben correlacionarse con los residuos en otro momento  $t_1$  (correlación serial).

### 5.3 Estadística descriptiva de series de tiempo

Aun una descripción muy simple de las series de tiempo de las variables asociadas con los procesos de financiación y realización de la investigación pueden revelar elementos claves de las dinámicas sociales y económicas subyacentes de, por ejemplo, una política gubernamental de financiación de la investigación. En ocasiones, una simple curva de variación en el tiempo de algunas variables, un ejercicio casi trivial cuando las series son conocidas, proporciona indicios claves de los efectos de un programa dado.

La figura 5.1, por ejemplo, muestra la evolución del número de artículos publicados por autores asociados con alguna institución localizada en Colombia, junto con los valores anuales de gastos nacionales en actividades de I+D. A partir de la figura, es prácticamente obvio que la productividad de los investigadores nacionales está íntimamente relacionado con la variación de las inversiones. De hecho, la gráfica muestra claramente que una reducción de las inversiones tiene un efecto casi inmediato, pero prolongado, sobre la productividad de los investigadores. La figura muestra también que, después de un período de crecimiento sostenido en la financiación de la investigación, se alcanzó un pico en 2013, seguido por una reducción muy marcada. En forma similar, hubo una reducción menor en 2010 de los gastos en I+D, el cual provocó una ligera desaceleración de la producción científica durante los períodos siguientes. Esto, por supuesto, sugiere una relación causal pero dinámica, la cual es mucho más evidente en la brusca reducción de la producción de artículos resultante de los recortes de la financiación de la investigación, iniciados en 2013.

Tal vez la idea más importante que sugiere la figura 5.1 es que la relación entre las dos variables es dinámica. Esto significa que la respuesta ante un recorte de financiación no es inmediata sino que produce efectos perdurables en el tiempo. Es decir, que con respecto al número de artículos como resultado del proceso, sus valores futuros están determinados por toda la historia de las inversiones, no por los valores inmediatamente anteriores.

Numerosos ejemplos sugieren que los valores de los gastos en I+D también se ven influenciados por los resultados de las investigaciones. En el caso colombiano, la nueva política de asignación de los recursos petrolíferos, conocida como Sistema General de Regalías, implementado en 2012, parece tener una fuerte relación con la reducción en las inversiones en I+D en todo el país, como se muestra en la figura 5.1.

Como otra ilustración del poder de una representación simple de series de tiempo, considérese la figura 5.2, la cual muestra la evolución en el tiempo del logaritmo del número de artículos publicados en diez países, escogidos arbitrariamente. Las series han sido identificadas por el código internet de cada país. A partir de la figura se puede identificar una sincronía notable entre las producciones científicas de Estados Unidos (US) y el Reino Unido (UK). También es muy llamativo el caso de China (CN): la producción de

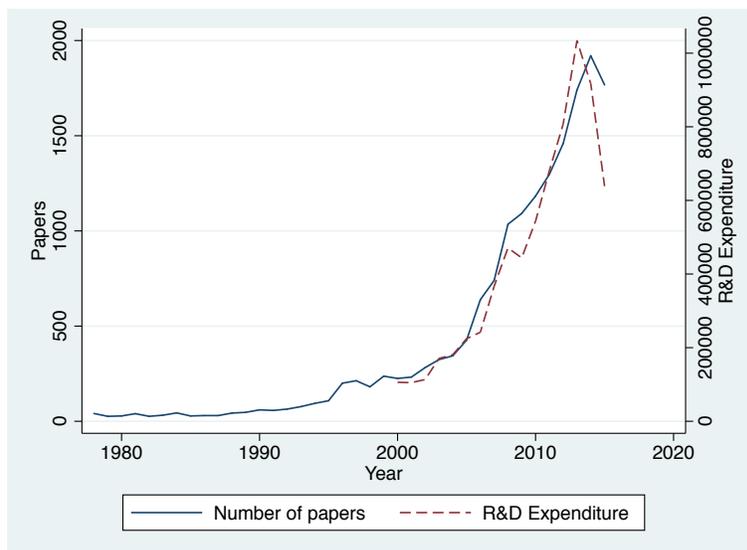


Figura 5.1: Series de tiempo del número de artículos publicados en revistas incluidas en Scopus por autores colombianos en medicina (Fuente: Scopus) y de gastos nacionales en I+D. Fuente: (Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, 2015).

artículos entre 1950 y 1978 fue la de menor producción de todos los diez países mostrados. Pero 35 años más tarde, su producción ha superado la de los demás países, excepto Estados Unidos, y continúa acercándose a éste. También es notable, a partir de la gráfica, que entre los países latinoamericanos mostrados Brasil está muy adelante y la brecha es muy grande con Argentina, Chile y Colombia. Entre los países europeos incluidos, el Reino Unido lidera la producción sobre Alemania (DE) y España.

Nótese que para casi todos los diez países ocurrió un cambio que parece estructural, en 1995, con un aumento súbito seguido por un período estacionario y luego una reducción en 2002. Esta última coincide con la recesión mundial de la época.

Por último, cabe resaltar el caso de Japón (JP), que ha permanecido estancado desde 2000. En 1995, Japón estaba a punto de sobrepasar al Reino Unido y convertirse en el segundo productor de publicaciones científicas del planeta. Sin embargo en 2002 su producción disminuyó y desde entonces su producción ha permanecido casi constante. Al final de este período fue superado por Alemania y China.

Otra herramienta útil del análisis de series de tiempo es la **función de autocorrelación**, la cual está definida como la correlación de la variable consigo misma a diferentes instantes de tiempo. Matemáticamente se define como:

$$R(s, t) = \frac{E[(X_t - \mu_t)(X_s - \mu_s)]}{\sigma_t \sigma_s},$$

donde  $\mu_t = E[X_t]$  y  $\mu_s = E[X_s]$ , respectivamente y  $\sigma_t$  y  $\sigma_s$  representan la desviación estándar en los instantes  $t$  y  $s$ .

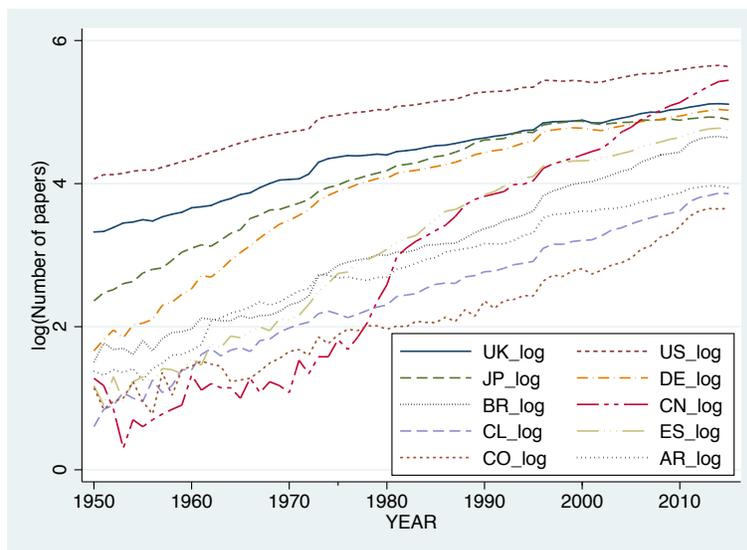


Figura 5.2: Logaritmo del número de papers publicados en varios países (Fuente: Scopus).

Cuando el proceso estocástico es estacionario, la autocorrelación depende solamente de la diferencia  $\tau = s - t$ . Por lo tanto se puede definir,

$$R(\tau) = \frac{E[(X_t - \mu)(X_{t+\tau} - \mu)]}{\sigma^2}.$$

Esta función cuantifica qué tanto varían en forma conjunta los valores actuales de una variable con los valores futuros (o pasados, cuando  $\tau < 0$ ) de la misma variable. Por ello, puede proveer información valiosa acerca de un proceso. Esta variación conjunta normalmente se asocia con influencia mutua.<sup>1</sup> Para ilustrar el tipo de información que se puede obtener, consideremos la figura 5.3(a), la cual muestra la autocorrelación del número de artículos publicados por autores colombianos, como se describió anteriormente. Se ve claramente que los valores actuales de las publicaciones se ven influenciados fuertemente por al menos el número de artículos publicados durante los tres últimos años. En la gráfica, la banda gris representa un intervalo de confianza del 95 %. Eso significa que los valores de la función que caigan dentro de la banda pueden considerarse que no difieren significativamente de cero. Esa es la razón por la cual decimos que, con una confianza del 95%, los valores de los tres años anteriores influyen el valor actual. Este tipo de comportamiento, por supuesto, es de esperar para esta clase de variable: la producción de

<sup>1</sup>Por supuesto, no es posible demostrar que esta influencia implique relaciones de causalidad. Solamente significa que los dos valores tienden a variar conjuntamente. Sin embargo, esto también es cierto para cualquier análisis basado en modelos de regresión, incluyendo los métodos clásicos de evaluación de impacto. No obstante, en el caso de las autocorrelaciones, la causalidad es más plausible dadas las características de los procesos estocásticos que generan los valores de la serie; aun cuando no pueda afirmarse que un valor pasado fue el causante del valor actual, es muy probable que la variación conjunta si obedezca a una causa común subyacente.

un grupo de investigación dado es generalmente el resultado de su trabajo investigativo durante un período de tiempo precedente. No obstante, la figura sí permite cuantificar de manera más precisa el número de períodos durante los cuales dicha importancia se siente. La función de autocorrelación para los autores franceses, mostrada en la figura 5.3(b), por otra parte, muestra una relación dinámica muy diferente, caracterizada por influencias significativas entre las producciones de períodos separados más de diez años. De hecho, funciones de autocorrelación como la de las publicaciones francesas aparecen para todos los países desarrollados con una tradición científica de largo plazo. Solo China, entre las potencias económicas, tiene una dinámica caracterizada principalmente por influencias de corto plazo.

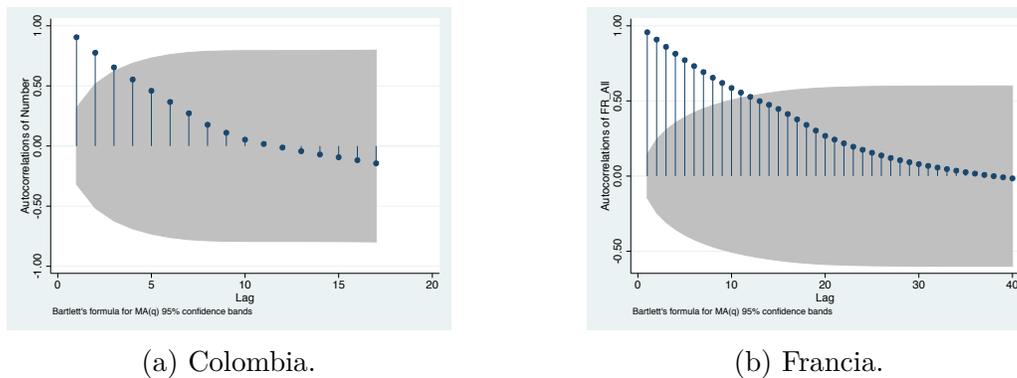


Figura 5.3: Función de autocorrelación del número de artículos Scopus publicados por autores colombianos (a) y franceses (b) (Fuente: Scopus). La banda gris representa un intervalo de confianza del 95 %.

Por último, consideremos la **función de correlación cruzada** entre dos series de tiempo. Esta función cuantifica cuán similares son las dos series, como función del retardo entre la ocurrencia de los valores de una con respecto a la otra. La función de Correlación Cruzada de dos procesos estocásticos estacionarios  $X_t$  y  $Y_t$  se define por:

$$\rho_{XY}(\tau) = \frac{E[(X_t - \mu_X)(Y_{t+\tau} - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y},$$

donde  $\mu_X = E[X_t]$  y  $\mu_Y = E[Y_t]$ , respectivamente y  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  representan las desviaciones estándar de  $X$  y  $Y$ , respectivamente. El retardo  $\tau$  puede ser positivo o negativo. Un retardo positivo significa que se calcula la correlación de  $X$  con valores anteriores de  $Y$ . Valores negativos de  $\tau$  simplemente implican que se calcula la correlación de  $X$  con valores futuros de  $Y$  (o, lo que es equivalente, la correlación de  $Y$  con valores anteriores de  $X$ ).

Para ilustrar el uso que puede tener la función de correlación cruzada en el análisis de los procesos de investigación, se calcularon las funciones de correlación cruzadas para examinar las interacciones dinámicas entre las publicaciones de autores de varios países. La figura 5.5 muestra la correlación cruzada del número de artículos en Scopus publicados por autores del Reino Unido y los de autores de (a) Estados Unidos y (b) China. Se puede observar que las correlaciones entre los autores estadounidenses y los británicos

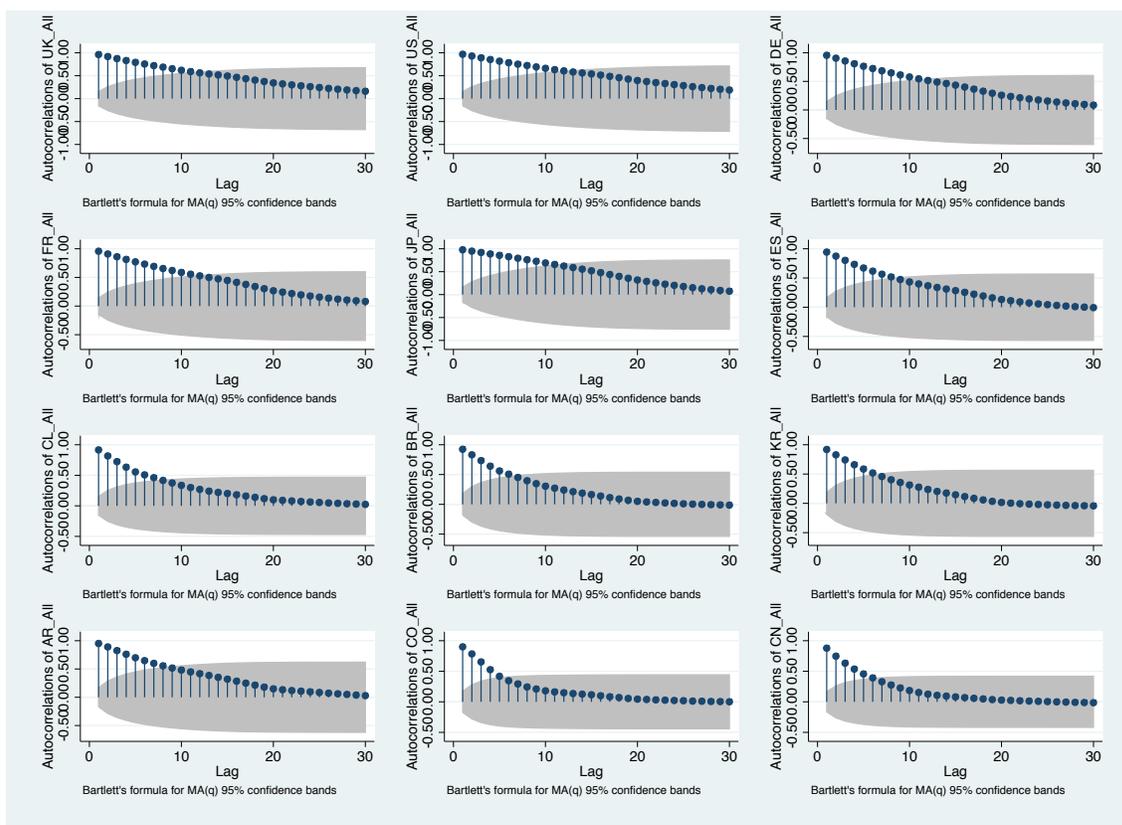
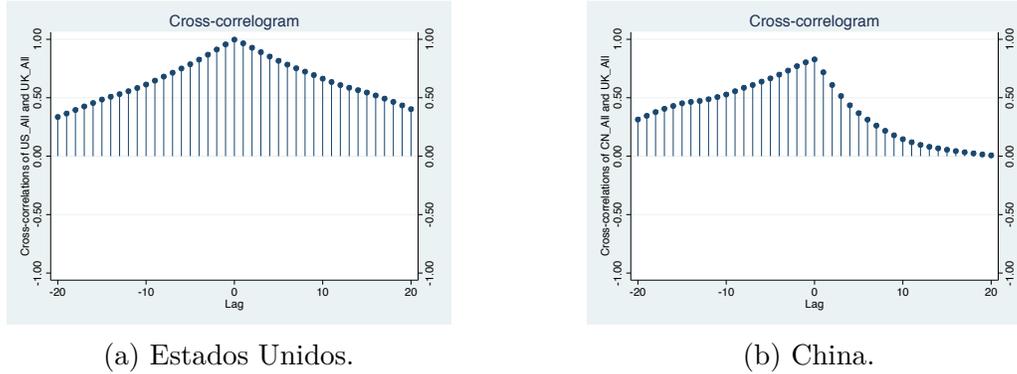


Figura 5.4: Autocorrelaciones de publicaciones de diferentes países (Fuente: Scopus database).

son mucho más simétricas que las de los británicos con los chinos. Esto significa que los valores de publicaciones chinas varían en forma más similar a los valores pasados de las británicas. Las publicaciones británicas, por otra parte, varían menos ante variaciones de las publicaciones pasadas chinas, lo cual podría interpretarse como una medida de las influencias mutuas. En este caso, correspondería a una mayor influencia del Reino Unido sobre China que en la dirección contraria. Análisis similares fueron efectuados para diversos grupos de países y los resultados muestran que las correlaciones cruzadas entre pares de países con una tradición científica extensa, son muy similares a la figura 5.5(a), mientras que las de países desarrollados con países en desarrollo son casi todas similares a 5.5(b). Este tipo de análisis fue efectuado para las publicaciones de campos del conocimiento individuales, incluyendo, medicina, agricultura, ingeniería, física y ciencias sociales, todos los cuales muestran un comportamiento similar al de la figura.

## 5.4 Análisis de intervención

Con frecuencia, en el curso del análisis de impacto de una nueva política o condición, se busca estudiar si la política en cuestión ha tenido algún efecto sobre otra variable,



(a) Estados Unidos.

(b) China.

Figura 5.5: Función de correlación cruzada del número de artículos en Scopus publicados por autores del Reino Unido y autores de (a) Estados Unidos y (b) China) (Fuente: Scopus database).

considerada como la variable de resultado. El **Análisis de Intervención** es una técnica que permite cuantificar el efecto de un cambio de política sobre la variable de resultado. Esta técnica fue usada por Enders *et al.* (Enders et al., 1990) para estimar el efecto de instalar detectores de metales en los aeropuertos, como una medida para controlar los secuestros de aviones en vuelos comerciales. Ese trabajo de Enders ha servido de inspiración para el trabajo que se describe a continuación.

Con el fin de estudiar el efecto de una condición dada (por ejemplo, un cambio en el mecanismo de selección de proyectos a ser financiados) consideramos, basados en el trabajo de Enders, que es posible establecer una relación dinámica entre el resultado  $y_t$  en el tiempo  $t$  y la intervención, la cual denotamos por  $z_t$ . Esta es simplemente una variable *dummy*, que indica si en el tiempo  $t$  la nueva política está en vigor o no; es decir que si la nueva política se adopta en el tiempo  $T$ , entonces,

$$z_t = \begin{cases} 0 & t < T \\ 1 & t \geq T \end{cases} \quad (5.1)$$

A partir de esta definición, se puede usar un modelo ARMAX( $p, q$ ) ( **A**uto**R**egressive **M**oving **A**verage with an **e**Xternal independent variable) de la forma,

$$y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \cdots + a_p y_{t-p} + c_d z_t + b_0 \varepsilon_t + b_1 \varepsilon_{t-1} + \cdots + b_q \varepsilon_{t-q}. \quad (5.2)$$

el cual se puede escribir en forma simbólica como,

$$y_t = a_0 + A(L)y_{t-1} + c_0 z_t + B(L)\varepsilon_t, \quad (5.3)$$

donde  $A(L)$  es un polinomio de grado  $p$  en el operador de retardo  $L$ <sup>2</sup> y  $B(L)$  es un polinomio de grado  $q$  en  $L$ .  $z_t$  es una variable independiente, (*dummy*) que caracteriza

<sup>2</sup> $L$  se puede definir por la relación  $L y_t := y_{t-1}$  y, más generalmente,  $L^k y_t := y_{t-k}$ ; es decir, como un operador de retardo en el tiempo. Así,  $A(L) = a_1 L + a_2 L^2 + \cdots + A_p L^p$ .

la vigencia o no de una política en un momento dado  $t$ , como se definió anteriormente.  $\varepsilon_t$  es una perturbación aleatoria representada como un ruido blanco, que cuantifica las fluctuaciones aleatorias del proceso.

Dada la naturaleza de la financiación de las investigaciones, los dineros asignados a financiar investigaciones no tendrán un efecto inmediato sobre la producción de un investigador o grupo de investigación. Los efectos solo aparecerán después de un cierto retardo que depende de los mecanismos administrativos y de la dinámica del proceso de investigación. Por lo tanto, el modelo anterior debe ser remplazado por uno donde la variable de intervención  $z_t$  aparezca con un cierto retardo  $d$ .

$$y_t = a_0 + A(L)y_{t-1} + c_d z_{t-d} + B(L)\varepsilon_t. \quad (5.4)$$

La cual se puede escribir en forma explícita así:

$$y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \cdots + a_p y_{t-p} + c_d z_{t-d} + b_0 \varepsilon_t + b_1 \varepsilon_{t-1} + \cdots + b_q \varepsilon_{t-q}. \quad (5.5)$$

Los coeficientes de esta ecuación se pueden estimar usando la metodología estándar de Box-Jenkins (Box et al., 2008).

Una vez obtenido el modelo anterior, es posible estimar el efecto de la nueva política sobre la variable de resultado, como sigue: puesto que estamos interesados en los efectos de largo plazo de  $z_t$ , analizamos lo que sucede cuando se llega a un estado estacionario; es decir, cuando el valor esperado de  $y_t$  es independiente del tiempo (lo cual significa que  $E[y_t] = E[y_{t-k}] = \bar{y}$ ). Por lo tanto, en la ecuación 5.5, se puede despejar  $\bar{y}$ , teniendo en cuenta que  $E[\varepsilon_t] = 0$ ,

$$\bar{y} \left[ 1 - \sum_{i=1}^p a_i \right] = a_0 + c_d \bar{z}_t.$$

Naturalmente, cuando la política está vigente,  $E[z_t] = \bar{z} = 1$ ; en caso contrario,  $E[z_t] = \bar{z} = 0$ . Por lo tanto definiendo  $\bar{y}_{\text{con}}$  y  $\bar{y}_{\text{sin}}$  como los resultados esperados con y sin la nueva política, respectivamente, se obtiene:

$$\bar{y}_{\text{sin}} = \frac{a_0}{1 - \sum_{i=1}^p a_i}, \quad \bar{y}_{\text{con}} = \frac{a_0 + c_d}{1 - \sum_{i=1}^p a_i}.$$

Lo cual significa que el efecto de la introducción de la nueva política se puede estimar como

$$\bar{y}_{\text{con}} - \bar{y}_{\text{sin}} = \frac{c_d}{1 - \sum_{i=1}^p a_i}. \quad (5.6)$$

Para ilustrar el uso del análisis de intervención consideremos la serie de tiempo del número de publicaciones trimestrales de los investigadores colombianos trabajando en el área de malaria. En este caso se busca estimar el efecto que tuvo la implementación del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SNCTI), introducido en 1992, sobre la producción de los investigadores trabajando en ese campo. Por lo tanto, se introduce una variable *dummy*  $z_t$  definida como en la ecuación 5.1, con  $T = 1992q1$ .

Después de un proceso de pre-procesamiento de los datos se obtuvo un modelo de la forma<sup>3</sup>:

$$y_t = 0.0108z_{t-2} - 1.7277y_{t-1} - 1.6499y_{t-2} - 1.5970y_{t-3} - .68070y_{t-4} \quad (5.7)$$

$$+ 0.86904\varepsilon_{t-2}, \quad (5.8)$$

donde  $y_t$  está definida como la diferencia del logaritmo del número de artículos publicados  $p_t$  en el tiempo  $t$ ,

$$y_t := \log(1 + p_t) - \log(1 + p_{t-1}) = \log\left(\frac{1 + p_t}{1 + p_{t-1}}\right). \quad (5.9)$$

La transformación logarítmica (base 10) se introduce para facilitar el tratamiento de números, variables en un intervalo amplio. La diferenciación se introdujo para obtener un proceso estacionario. Por otro lado, en el modelo se especificó una constante igual a cero, dado que las series habían sido diferenciadas.

Con base en este modelo, se puede estimar el efecto de la introducción de la nueva política, mediante la ecuación 5.6:

$$\bar{y} = \frac{0.0108}{1 + 1.7277 + 1.6499 + 1.5970 + 0.68070} = 0.0016294.$$

Este resultado se puede interpretar en términos de las variables originales. A partir de la última ecuación y usando 5.9, se tiene en el largo plazo,

$$\frac{1 + p_t}{1 + p_{t-1}} = 10^{0.0016294} = 1.0037591,$$

o,

$$p_t = 1.0037591 p_{t-1} + 0.0037591.$$

Lo cual significa que el número esperado de publicaciones de un trimestre supera al del anterior en 0.376 %. Esto quiere decir que ese nivel de crecimiento trimestral podría ser atribuido a la creación del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología en Innovación en Colombia.

## 5.5 Cambios estructurales

Uno de los objetivos fundamentales de los programas gubernamentales de financiación de la investigación, especialmente en países en desarrollo, es el de inducir comportamientos y cambios de actitud en investigadores e instituciones de investigación para lograr investigaciones más estructuradas, continuadas y más productivas. Con frecuencia, cantidades sustanciales de recursos son invertidas en programas tipo incubadora, orientados

---

<sup>3</sup>En realidad, tras la estimación del modelo, también se hizo un análisis post-estimación para garantizar que el modelo es adecuado.

a favorecer el entrenamiento de investigadores, así como a fortalecer las capacidades de investigación. Por estas razones, es importante poder verificar cuándo existe evidencia de cambios estructurales que afecten positiva o negativamente los procesos de investigación.

En la literatura de series de tiempo econométricas se han desarrollado varios métodos para identificar los cambios de la dinámica que reflejan cambios en comportamientos o en condiciones de un sistema o sector de la economía. Uno de los enfoques más utilizados consiste en efectuar una prueba de Chow para verificar si existe, o no, un estímulo generado exógenamente que hace cambiar la estructura del proceso dinámico que genera los datos. Este método, descrito en detalle por Enders (Enders, 2010), usa una variable tipo *dummy* para chequear si el modelo cambia en un determinado momento o no.

Para efectuar una prueba acerca de un cambio estructural en el tiempo  $t = t_s$ , se puede definir la variable *dummy* como se hizo en la ecuación 5.1: Sea  $z_t$  definida por

$$z_t = \begin{cases} 0 & t < t_s \\ 1 & t \geq t_s \end{cases}$$

A continuación, ajustamos un modelo Auto Regresivo (AR) de la forma:

$$y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \cdots + a_p y_{t-p} + \bar{a}_1 z_t y_{t-1} + \bar{a}_2 z_t y_{t-2} + \cdots + \bar{a}_p z_t y_{t-p} + \varepsilon_t. \quad (5.10)$$

Obsérvese que si cualquiera de los coeficientes  $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_p$  es significativamente diferente de cero, entonces se puede afirmar con confianza que ocurrió un cambio estructural en  $t = t_s$ . En efecto, supongamos que  $\bar{a}_i \neq 0$ , entonces el coeficiente de  $y_{t-i}$  en el modelo será

$$\begin{cases} a_i & t < t_s \\ a_i + \bar{a}_i & t \geq t_s \end{cases}$$

y, entonces, los modelos serán diferentes antes y después de  $t_s$ .

En la práctica, para la estimación se generan tres modelos: en primer lugar, un modelo global para todos los datos, desde  $t = 0$  hasta  $t = K$ , siendo  $K$  la longitud de la serie. Llamamos  $SSR$  a la suma de los cuadrados de los residuos de este modelo ajustado sin cambios estructurales. A continuación se obtiene un modelo con los datos desde  $t = 0$  hasta  $t = t_s$ , cuya suma de cuadrados de residuos se denomina  $SSR_1$ . Por último se obtiene otro modelo con los datos desde  $t = t_s$  hasta  $t = K$ , cuya suma de cuadrados de los residuos llamamos  $SSR_2$ ,

A continuación se usa el valor de la estadística (llamada de Chow)  $F$  definida como

$$F = \frac{[SSR - (SSR_1 + SSR_2)]/n}{(SSR_1 + SSR_2)/(T - 2n)},$$

donde  $n$  es el número de parámetros a ser estimados ( $2p + 1$  en este caso),  $T$  es la longitud de la serie de tiempo y  $T - 2n$  es el número de grados de libertad. El valor de  $F$  refleja la diferencia entre los errores obtenidos por tener un modelo que aplique a todo el intervalo

y los obtenidos con diferentes modelos para cada uno de los subintervalos. Si el mismo modelo aplica para los dos subintervalos y éstos son iguales al de toda la serie, entonces la diferencia de cuadrados sería cero. Lo que cuantifica la estadística  $F$  es, precisamente, la ventaja de tener dos modelos diferentes, antes y después del punto de quiebre, comparados con un solo modelo para toda la longitud.

La estadística de Chow  $F$  será mayor donde sea más probable la existencia de un cambio estructural. Por lo tanto, el procedimiento de identificación de cambios estructurales calcula el valor de la estadística para cada valor prospectivo de  $t_s$  y selecciona los instantes de tiempo donde  $F$  sea máxima<sup>4</sup>.

Este enfoque fue utilizado para estudiar la posibilidad de quiebres estructurales que ocurrieran en el desarrollo de la investigación en malaria en Colombia. Se obtuvo un modelo de la forma 5.10 para un intervalo de posibles valores de  $t_s$ . Los valores resultantes de la estadística  $F$  se muestran en la figura 5.6. La figura muestra dos máximos locales claramente diferenciados de  $F$ ; uno de los máximos ocurrió en 2005 y otro, mucho más pronunciado, en el primer trimestre de 2013.

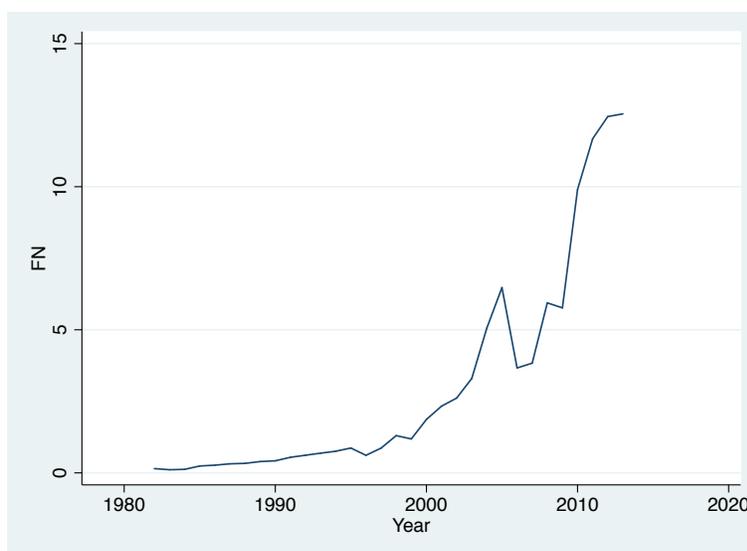


Figura 5.6: Valores recursivos de la estadística  $F$  para cambios estructurales en el número de artículos en medicina, por autores colombianos (Fuente: Scopus).

Existen otros métodos para identificar cambios estructurales. Uno fue desarrollado por Perron (Perron, 1989), en su estudio sobre la existencia de *shocks* exógenos que afectan un sistema económico. Otro método fue desarrollado por Elliot *et al.* (Elliott and Müller, 2006).

<sup>4</sup>La estadística  $\max_{t_s} F(t_s)$  se suele llamar, en la literatura una estadística “*Quandt likelihood ratio*,” o una estadística “sup-Wald.”

## 5.6 Modelos ADL (Autorregresivo con Retardo Distribuido)

Como hemos discutido antes, los efectos de la financiación de proyectos de investigación pueden ser bastante complejos y sus efectos acumulados se pueden manifestar de varias formas, dependiendo de las condiciones bajo las cuales la investigación se lleva a cabo y también de la institución que financia el proyecto. Sin embargo, una cosa sí es clara y es que la financiación afecta a toda la comunidad de investigadores, al menos en el área de investigación, durante un intervalo de tiempo variable. La longitud de dicho intervalo depende del campo de trabajo, pero también del tipo de investigación y aun de la personalidad y hábitos de los investigadores; sin embargo, existen aspectos comunes y regularidades estadísticas que permiten el desarrollo de un modelo econométrico útil. Para ello, consideramos un modelo donde el efecto de la financiación otorgada a los grupos es considerada por los efectos que produce, reflejados en la producción agregada de los investigadores de un área determinada. Nuestro trabajo aquí se basa en un modelo propuesto por Enders *et al* (Enders *et al.*, 1992) para evaluar los efectos de los ataques terroristas sobre la afluencia de turistas en algunos países.

Igual que antes, sea  $y_t$  una variable que cuantifica la producción de los investigadores en un campo del saber en una región o país, y sea  $g_t$  la cantidad de dinero otorgado como financiación, en el tiempo  $t$ . Se propone, entonces, un modelo de la forma:

$$y_t = a_0 + A(L)y_{t-1} + C(L)g_{t-d} + \varepsilon_t, \quad (5.11)$$

donde  $A(L)$  y  $C(L)$  son polinomios en el operador de retardo  $L$ . Aquí, nuevamente,  $\varepsilon_t$  es un proceso de ruido blanco. En forma explícita, el modelo queda como:

$$y_t = a_0 + a_1y_{t-1} + a_2y_{t-2} + \cdots + a_p y_{t-p} + c_0g_t + c_1g_{t-1} + \cdots + c_dg_{t-d} + \varepsilon_t. \quad (5.12)$$

Usando la ecuación 5.12 como punto de partida, es posible estimar los efectos de cambios en la cantidad de dinero destinada a financiar proyectos. Supongamos, por ejemplo, que queremos estimar los efectos de largo plazo de incrementos en  $g_t$  sobre el resultado  $y_t$  y que se ha alcanzado una condición de estado estacionario, donde  $E[y_t] = \bar{y}$  es independiente del  $t$ , bajo una condición de gasto constante también ( $E[g_t] = \bar{g}$ ). Entonces,

$$\bar{y} = \frac{a_0 + \bar{g} \sum_{i=1}^d c_i}{1 - \sum_{i=1}^p a_i}.$$

En consecuencia, el efecto de los cambios en la cantidad esperada de dinero invertido para financiar investigaciones, sobre la producción de los investigadores financiados, se puede calcular usando una aproximación de las derivadas parciales de  $\bar{y}$  con respecto a  $\bar{g}$ .

$$\frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{g}} \approx \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{g}} = \frac{\sum_{i=1}^d c_i}{1 - \sum_{i=1}^p a_i}. \quad (5.13)$$

Tal como se hizo en la discusión del análisis de intervención, a continuación vamos a ilustrar el cálculo con datos sobre el número de publicaciones de autores colombianos en el área de malaria. En este caso, se reunió información trimestral sobre dineros otorgados como financiación a proyectos del área por Colciencias. Se recolectaron datos de número de publicaciones declaradas por los grupos de investigación en la aplicación GrupLAC para la medición de grupos. A partir de lo anterior se obtuvo un modelo ARX (AR con una entrada eXógena)l:

$$y_t = -0.95094 y_{t-1} - 0.90490 y_{t-2} - 0.89231 y_{t-3} + 0.01442 g_{t-3} + \varepsilon_t.$$

Luego, a partir de la ecuación 5.13,

$$\frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{g}} = \frac{c_3}{1 - \sum_{i=1}^3 a_i} = 0.00385.$$

Por lo tanto, se puede esperar un crecimiento de 0.39 % en la variable de resultado por un cambio de 1 % en la cantidad de dinero de financiación, adicional.

## 5.7 VAR (Modelos Auto-Regresivos Vectoriales)

Un cálculo de la correlación entre la producción científica y las variables que cuantifican la financiación de la investigación muestra que existen correlaciones muy significativas entre los dos tipos de variables. Esto sugiere que la cantidad de dinero asignado a financiar proyectos de investigación podría no ser completamente exógena. En ese caso, su valor podría estar influenciado por los resultados de la investigación. De hecho, es muy posible que proyectos de investigación exitosos lleven a una mayor disponibilidad a financiar otros proyectos, por ejemplo.

Una forma de tener en cuenta dichos efectos de retroalimentación consiste en considerar un modelo de la forma,

$$\begin{aligned} y_t &= a_{01} + a_{11}y_{t-1} + a_{12}z_{t-1} + \cdots + \varepsilon_{1t} \\ z_t &= a_{02} + a_{21}y_{t-1} + a_{22}z_{t-1} + \cdots + \varepsilon_{2t}, \end{aligned}$$

para un sistema con un solo retardo. La anterior ecuación podría escribirse en forma general definiendo vectores y matrices seleccionados de forma adecuada. Sea

$$x_t = \begin{bmatrix} y_t \\ z_t \end{bmatrix}.$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir como un modelo VAR estándar:

$$x_t = A_0 + A_1 x_{t-1} + e_t, \quad (5.14)$$

donde

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{bmatrix}; \quad A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad e_t = \begin{bmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \end{bmatrix}.$$

En la práctica vamos a necesitar retardos mayores que uno y, seguramente, más de dos variables. Por lo tanto, utilizamos un modelo general

$$x_t = A_0 + A_1x_{t-1} + A_2x_{t-2} + \cdots + A_px_{t-p} + e_t, \quad (5.15)$$

donde las matrices  $A_i$  cuantifican los efectos que tienen los valores retardados (anteriores) de las variables sobre los valores actuales. Ver Enders ([Enders, 2010](#)), para los detalles de las definiciones.

Estos modelos VAR permiten estudiar las influencias mutuas entre grupos de variables y proporcionan una herramienta valiosa para el análisis de la forma como un proceso afecta a otro. Como ilustración de dichas influencias mutuas, estudiamos la producción de científicos de varios países. Se construyeron series de tiempo a partir de la base de datos de Scopus con el número de artículos publicados. Los datos de diez países, escogidos arbitrariamente, fueron estudiados y se presentan en la figura 5.2.

Para evaluar cómo la producción científica de un país se relaciona con la producción de otros países, se seleccionaron cinco países: Estados Unidos (US), Reino Unido (UK), Alemania (DE), Francia (FR) y China (CN), con el fin de desarrollar un modelo VAR. Después de numerosos intentos, se llegó a la conclusión de que China sigue un patrón diferente de los otros cuatro y, por lo tanto, se excluyó del análisis. En realidad, el hecho de que la dinámica de la producción científica de China siga un patrón diferente al de los otros países podría haberse predicho a partir de la observación de las series; esto es algo que numerosos intentos fallidos, de obtener un modelo adecuado, confirmaron.

En consecuencia, se desarrolló un modelo VAR con cuatro retardos, el cual da una buena aproximación a la variación conjunta del número de artículos publicados por autores de los cuatro países. Aunque no presentaremos los detalles aquí, se puede ver que las características estadísticas son satisfactorias.

A partir del modelo VAR, es posible obtener una función de **respuesta al impulso** (IRF, por su nombre en inglés —*impulse response function*). La IRF ([Reinsel, 2003](#)) describe el efecto que tiene un incremento de una unidad (una desviación estándar) en el valor actual de una variable, sobre todas las variables incluidas en el modelo. Se supone una perturbación tipo impulso:

$$\delta_t = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases},$$

lo cual significa que una de las variables se desvía, momentáneamente, del balance; la IRF describe cómo afecta esto a todas las variables (incluida la que se desvía) en el tiempo. Para el ejemplo a mano, la IRF resultante para las cuatro variables se muestra en la figura 5.7. Según se puede observar en la figura 5.7, los aumentos en la producción científica de Francia (FR) y Alemania (DE) tienen un ligero efecto sobre el otro, pero muy poco sobre Estados Unidos (US) y Reino Unido (UK). En cambio, los aumentos de producción del Reino Unido parecen tener el mayor impacto sobre los otros, incluyendo una gran influencia sobre FR y DE. Los cambios en la producción de los autores estadounidenses tienen un efecto intermedio.

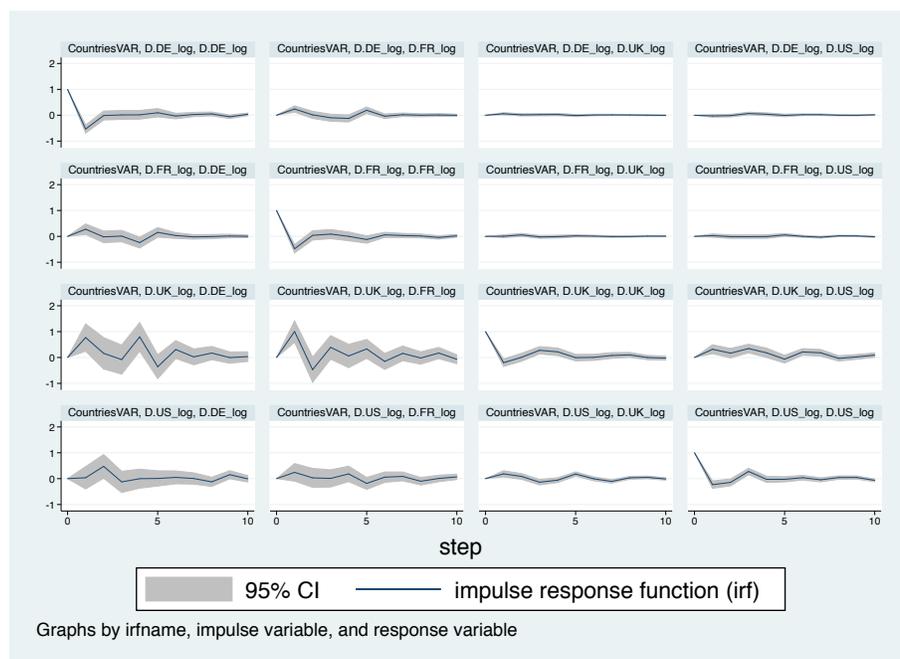


Figura 5.7: Función de Respuesta al Impulso (IRF) del número de artículos publicados por autores de cuatro países (DE, FR, UK, US). Cada fila muestra el efecto sobre todos los países de un impulso en uno de los países (el que empieza en 1).

En forma similar, se desarrollaron modelos VAR para el número de artículos publicados en varias áreas por autores de los mismos países y los resultados son muy similares. Aunque los detalles no serán presentados aquí, vale la pena anotar que Francia parece ser al país más afectado por cambios en la producción de los otros países. Los cambios en la producción de Estados Unidos y Reino Unido tienen el mayor efecto mientras Francia y Alemania parecen afectarse mutuamente, con débil influencia sobre los otros. En física, estos dos últimos países parecen tener un efecto ligeramente mayor, mientras en medicina su impacto es bastante menor.

## 5.8 Cointegración

Muchas de las variables usadas para caracterizar los resultados de la financiación de proyectos de investigación son no estacionarias. Por ejemplo, en los países en desarrollo se espera que los recursos asignados a la financiación de la investigación crezcan en el tiempo. En realidad, los gastos nacionales en I+D muestran una tendencia creciente en la mayoría de los países. También se espera que el número de artículos publicados y el número de patentes concedidas como resultado de las investigaciones crezcan en el tiempo y, por lo tanto, se podría esperar que existiera una especie de balance entre las dos variables. Los modelos de **corrección de error vectoriales** (Vector Error Corrección — VEC)

permiten analizar dichas relaciones de balance. Dichos modelos permitirían, por ejemplo, estudiar el balance entre campos diferentes cuando se asignan fondos para investigación. Para una referencia, puede consultarse Engle and Granger (Engle and Granger, 1987).

Debido a la influencia de los métodos usados en el análisis de series univariadas, se emplearon inicialmente métodos para transformar las series en variables estacionarias, por ejemplo por diferenciación y, una vez logrado esto, se utilizaban modelos tipo VAR para describir las relaciones entre las variables. Sin embargo, tras alguna experiencia con datos multivariados, se observó que las variables integradas<sup>5</sup> podrían presentar tendencias que se “balanceaban” unas a otras. En consecuencia, Engle y Granger (Engle and Granger, 1987), consideraron una combinación lineal de variables integradas que podría ser estacionaria.

Para ilustrar este concepto, consideremos unas pocas variables: Sean  $x_t$ ,  $y_t$  y  $z_t$  variables integradas del mismo orden; por simplicidad, supongamos que son todas variables  $I(1)$ . Estas variables se denominan *cointegradas* si existe una combinación lineal,

$$\eta_t = \alpha_0 + \alpha_x x_t + \alpha_y y_t + \alpha_z z_t + \epsilon_t,$$

tal que  $\eta_t$  es una serie de tiempo estacionaria. En ese caso, es posible utilizar pruebas estadísticas estándar para demostrar la estacionaridad de  $\eta$  sin requerir que las series  $x_t$ ,  $y_t$  y  $z_t$  sean estacionarias, individualmente.

### Modelos Vectoriales de Corrección de Error (VEC)

Basados en la documentación de Stata (StataCorp, 2014), consideramos un vector  $K \times 1$  de variables de interés  $\mathbf{y}_t$  y supongamos que todas ellas son variables  $I(1)$ . Si construimos un modelo VAR con  $p$  retardos como:

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{v} + \mathbf{A}_1 \mathbf{y}_{t-1} + \mathbf{A}_2 \mathbf{y}_{t-2} + \cdots + \mathbf{A}_p \mathbf{y}_{t-p} + \epsilon_t, \quad (5.16)$$

donde  $\mathbf{v}$  es un vector constante  $K \times 1$  y  $\mathbf{A}_i$  son matrices  $K \times K$  de parámetros y  $\epsilon_t$  es un vector de ruido blanco con matriz de covarianza  $\Sigma$ , constante en el tiempo.

Esta última ecuación se puede convertir a la forma llamada modelo vectorial de corrección de error (Vector Error Correction Model — VECM):

$$\Delta \mathbf{y}_t = \mathbf{v} + \Pi \mathbf{y}_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta \mathbf{y}_{t-i} + \epsilon_t, \quad (5.17)$$

en donde se ha definido  $\Pi = \sum_{j=1}^p \mathbf{A}_j - \mathbf{I}_K$  y  $\Gamma_i = -\sum_{j=i+1}^p \mathbf{A}_j$  con  $\mathbf{I}_K$  una matriz identidad  $K \times K$ .

Engle y Granger (Engle and Granger, 1987) han demostrado que si todas las componentes del vector  $\mathbf{y}$  son  $I(1)$ , entonces el rango de la matriz  $\Pi$  en la ecuación 5.17 es igual al número de vectores cointegrantes linealmente independientes. Además, cuando el intervalo  $r < K$  entonces, la matriz se puede escribir como  $\Pi = \alpha \beta'$  donde  $\beta$  y  $\alpha$  son matrices de rango  $r$ . Por lo tanto, es muy importante calcular el rango de cointegración ( $r$ ) de las variables, siempre que se quiera usar un modelo tipo VECM.

<sup>5</sup>Ver apéndice B.1.2 para la definición de variables integradas.

### Coefficientes de ajuste

A continuación usaremos el llamado enfoque de Johansen. Supongamos que existe alguna tendencia determinística además de la constante  $\mathbf{v}$ , tal que la ecuación 5.17 se convierte en,

$$\Delta \mathbf{y}_t = \mathbf{v} + \delta t + \alpha \beta' \mathbf{y}_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} i \Delta \mathbf{y}_{t-i} + \varepsilon_t. \quad (5.18)$$

Puesto que la matriz  $\alpha$  tiene rango  $r$ , las tendencias determinísticas, en términos de dicha matriz, se pueden incluir en la forma:

$$\mathbf{v} = \alpha \mu + \gamma \quad (5.19)$$

$$\delta t = \alpha \rho t + \tau t. \quad (5.20)$$

Entonces, la ecuación 5.18 se puede escribir en la forma

$$\Delta \mathbf{y}_t = \alpha(\mu + \rho t + \beta' \mathbf{y}_{t-1}) + \sum_{i=1}^{p-1} i \Delta \mathbf{y}_{t-i} + \tau t + \gamma + \varepsilon_t. \quad (5.21)$$

Los coeficientes  $\alpha$  se denominan *Coefficientes de Ajuste*. Puesto que las variables  $y_t$  están en equilibrio, una desviación temporal en una de ellas requiere que las otras variables sufran ajustes para recobrar el balance. Los coeficientes  $\alpha$ , por lo tanto, cuantifican la magnitud de dichos ajustes.

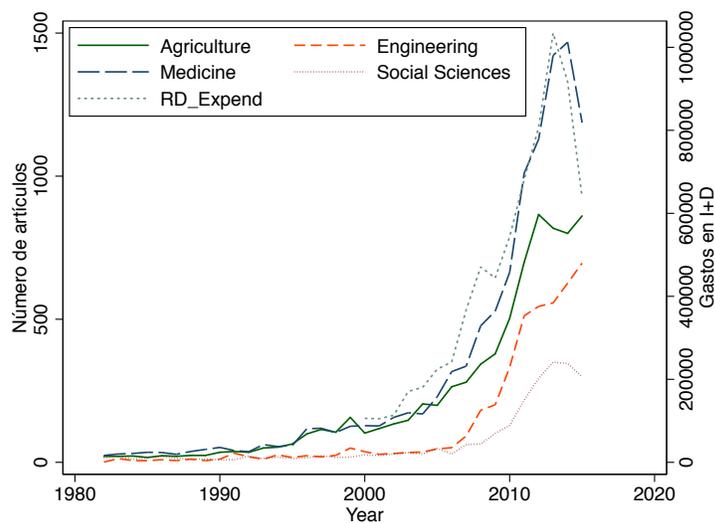


Figura 5.8: Evolución del número de artículos para cuatro áreas de investigación y de la inversión nacional en I+D.

	Agriculture	Engineering	Medicine	SocialSciences	L.RD Expend
Agriculture	1.0000				
Engineering	0.9856	1.0000			
Medicine	0.9749	0.9725	1.0000		
SocialSciences	0.9709	0.9690	0.9892	1.0000	
L.RD Expend	0.9495	0.9624	0.9723	0.9599	1.0000

Tabla 5.1: Matriz de correlación del número de publicaciones en varias áreas y la inversión en I+D.

## 5.9 Pronósticos

Uno de los principales objetivos por los cuales construimos un modelo de serie de tiempo es el de poder pronosticar valores futuros de la variable de resultado. Este propósito es especialmente importante para la evaluación *ex ante* de políticas públicas puesto que, en ese caso, estamos interesados en estimar los efectos posibles de una decisión de inversión dada sobre los resultados de los proyectos de investigación que son financiados. Por lo tanto, uno de los principales resultados de estos análisis será una serie de tiempo de valores predichos durante un horizonte de tiempo especificado de antemano.

Para predecir los valores de la(s) variable(s) de interés, se supone que están disponibles los valores previos de esas variables. Esta condición, en realidad no presenta ninguna dificultad puesto que dicha información se necesita, de todas maneras, para la construcción del modelo. Cualquiera de los tipos de modelos considerados hasta ahora, pueden ser utilizados para “simular” los valores futuros de las variables, basados en los valores actuales y pasados y en el sistema dinámico definido por el modelo. Normalmente lo que se busca predecir es el valor esperado de los valores futuros, sin embargo, los modelos también dan estimaciones de los intervalos de confianza de las variables pronosticadas.

Como ilustración, consideremos un modelo de la relación existente entre los gastos nacionales en I+D y el número de artículos publicados por autores vinculados a alguna institución colombiana, como se muestra en la figura 5.1. Se ajustó un modelo ARMAX de la forma:

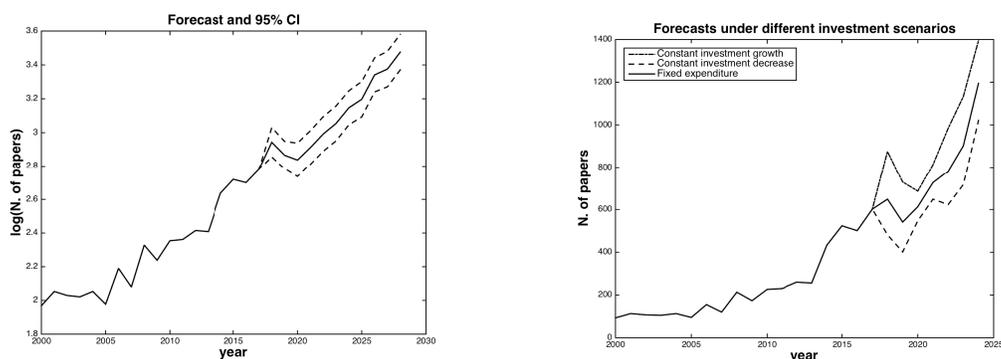
$$y_t = -0.62513y_{t-2} + 0.18466g_t + 0.22927g_{t-1} + \varepsilon_t,$$

donde, como anteriormente,  $y_t$  es la variable que mide el impacto (número de publicaciones, en este caso) y  $g_t$  representa los gastos nacionales en I+D, ambos en el tiempo  $t$ .

Este modelo se usó para simular diferentes escenarios de estrategias de inversiones futuras. Los valores resultantes se predicen mediante una simulación estocástica del modelo anterior. El ruido blanco  $\varepsilon_t$ , por su parte, se genera mediante un generador de números aleatorios, distribuidos normalmente, con media cero y varianza dada por el proceso de estimación del modelo ARMAX.

Para estimar los efectos de la aleatoriedad, se simularon cada una de las alternativas mediante un proceso de replicaciones tipo Monte Carlo. Se generaron 10000 replicaciones de cada escenario y los valores se registraron para establecer estimados robustos de la media y el intervalo de confianza. Esto quiere decir que, una vez obtenido el modelo, los datos de valores estimados son calculados en forma no paramétrica; es decir, sin ninguna

suposición acerca de las distribuciones de probabilidad. Por simplicidad, se simuló, en primer lugar, una política donde se mantiene la inversión al nivel del último año, lo cual significa que la variable diferenciada  $g_t$  es igual a cero. A partir de las 10000 replicaciones, se calcularon valores medios y un intervalo de confianza del 95 % para el horizonte de pronóstico. Los resultados se muestran en la figura 5.9(a).



(a) Pronóstico bajo la política actual

(b) Efecto de políticas alternativas

Figura 5.9: Pronóstico de publicaciones de autores colombianos.

Una vez obtenido el modelo, utilizamos sus resultados para evaluar, *ex ante* políticas públicas alternativas con respecto a la financiación de I+D. Se simularon tres escenarios: en el primero se hizo la suposición de que las inversiones permanecerían constantes al nivel del último año. Un segundo escenario supuso que se seguiría presentando una variación anual igual a la que ocurrió el último año; hay que observar que en el caso bajo análisis, es decir el cambio de inversiones de 2014 a 2015, esta variación fue negativa. Esto supone que la inversión continuaría disminuyendo. La última alternativa simulada consiste en suponer que los gastos de I+D estarán sujetos a un cambio anual igual a menos la variación del último año; como esta variación fue negativa, el tercer escenario representa una condición de aumento sostenido de la inversión. Estos escenarios fueron simulados como se describió atrás y sus valores fueron registrados. Cada uno de los escenarios se simuló, tal como se describió antes, con un total de 10000 replicaciones para cada uno y se calcularon los valores esperados para cada año del pronóstico. La figura 5.9(b) presenta los resultados de las simulaciones de los escenarios.

En este ejercicio, el horizonte de pronóstico se tomó intencionalmente más largo de lo habitual, para ilustración. En la práctica, un período de pronóstico mayor de cinco años se usa raramente. Aunque los escenarios hipotéticos son bastante simples, los resultados ilustran claramente los fuertes efectos de la inversión en la financiación de proyectos sobre la producción científica nacional. El modelo predice incrementos o disminuciones cercanas al 25 % durante el horizonte de planeamiento.

Vale la pena recordar que se trata de una comunidad académica pequeña para la cual los efectos pueden ser muy pronunciados. Sin embargo la técnica general es aplicable en una situación general y sería de esperar que los resultados fueran, al menos cualitativamente, similares. También hay que anotar que esta metodología permite analizar el efecto

de políticas más complejas; variables en el tiempo, por ejemplo.

## 5.10 Procedimiento para utilizar análisis de series de tiempo

En este numeral se presenta un resumen de los pasos necesarios para emprender un estudio de una política pública de financiación de la investigación basado en series de tiempo. Estos pasos, no necesariamente, deben ser seguidos en forma secuencial. Únicamente los pasos de 1 a 5 son requeridos en cada estudio. La necesidad de utilizar herramientas adicionales de series de tiempo o complementar con otras herramientas de optimización dependerá de la naturaleza del problema que se esté abordando.

1. Defina la variable o variables de interés.
2. Levante la información histórica de la financiación y las variables y construya las series de tiempo respectivas. Entre más tiempo cubran las series de tiempo, mejor.
3. Calcule las estadísticas descriptivas de todas las variables.
4. Encuentre las autocorrelaciones y las correlaciones cruzadas de las principales variables de interés con el fin de determinar qué relaciones son significativas.
5. Realice la preparación de los datos (transformaciones y eliminación de tendencias). Realice las pruebas necesarias para asegurar estacionaridad (Dickey-Fuller).
6. Estime el efecto de cambios pasados de política. Haga análisis de intervención.
7. Calcule, en forma *ex ante*, los efectos de la financiación sobre las variables de resultado.
  - (a) Encuentre un modelo ARMAX (ARX), relacionando las variables de resultado con la magnitud de la financiación.
  - (b) Construya posibles escenarios de políticas de financiación futura.
  - (c) Pronostique los resultados para los posibles escenarios considerados.
8. Compare la producción en diferentes áreas de conocimiento, regiones o países.
  - (a) Diseñe un modelo VAR de grupos de resultados individuales.
  - (b) Calcule la función de respuesta al impulso (IRF - Impulse Response Function) para evaluar influencias mutuas.
9. Utilice el análisis de cambios estructurales con el fin de verificar si hubo cambios que afectaron la dinámica.

# Capítulo 6

## Modelo basado en agentes

En este capítulo, se presenta un modelo construido para simular el desarrollo del proceso de producción académica y científica por parte de los investigadores, su interacción con los grupos de investigación y con el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación. En primer lugar, se hace una descripción general del modelo conceptual usado para el desarrollo. A continuación se describe la implementación del modelo en un ambiente de simulación. Por último se presentan los resultados de la aplicación del mismo.

### 6.1 Modelo conceptual

En esta sección se presenta el modelo dinámico en forma conceptual, describiendo sus objetivos y la metodología de desarrollo, sus componentes y las interacciones entre ellos. También se discuten las premisas bajo las cuales se desarrolló nuestro modelo, junto con los protagonistas de la dinámica.

#### 6.1.1 Objetivos del modelo

El objetivo del modelo es establecer las relaciones dinámicas entre los diferentes participantes en el desarrollo de la investigación en el área de malaria y sus efectos sobre la producción académica, científica y tecnológica del área.<sup>1</sup> Se trata de representar relaciones de causa-efecto dinámicas con las cuales sea posible evaluar los efectos de diferentes condiciones de financiación y de organización, sobre la productividad de los investigadores y los grupos de investigación.

Un modelo de ese tipo podría usarse para hacer evaluación *ex ante* de programas de financiación o de las condiciones de participación de los grupos de investigación en las convocatorias.

---

<sup>1</sup>Aunque se utiliza el sistema de investigación en malaria, el desarrollo ha sido completamente general y puede aplicarse para la evaluación de sistemas de investigaciones en, básicamente, cualquier área del conocimiento.

### 6.1.2 Metodología

Como se discutió en la introducción, para el diseño del modelo basado en agentes, se adoptó una metodología de tipo inductivo; concretamente, se utilizó el marco **caracterización y parametrización** —CAP (por sus iniciales en inglés *Characterisation And Parameterisation*). En la figura 6.1, se muestra un esquema de la metodología. Esta sección está basada en (Smajgl and Barreteau, 2014), quienes proveen una fundamentación metodológica sólida para los modelos creados a partir de observaciones empíricas.

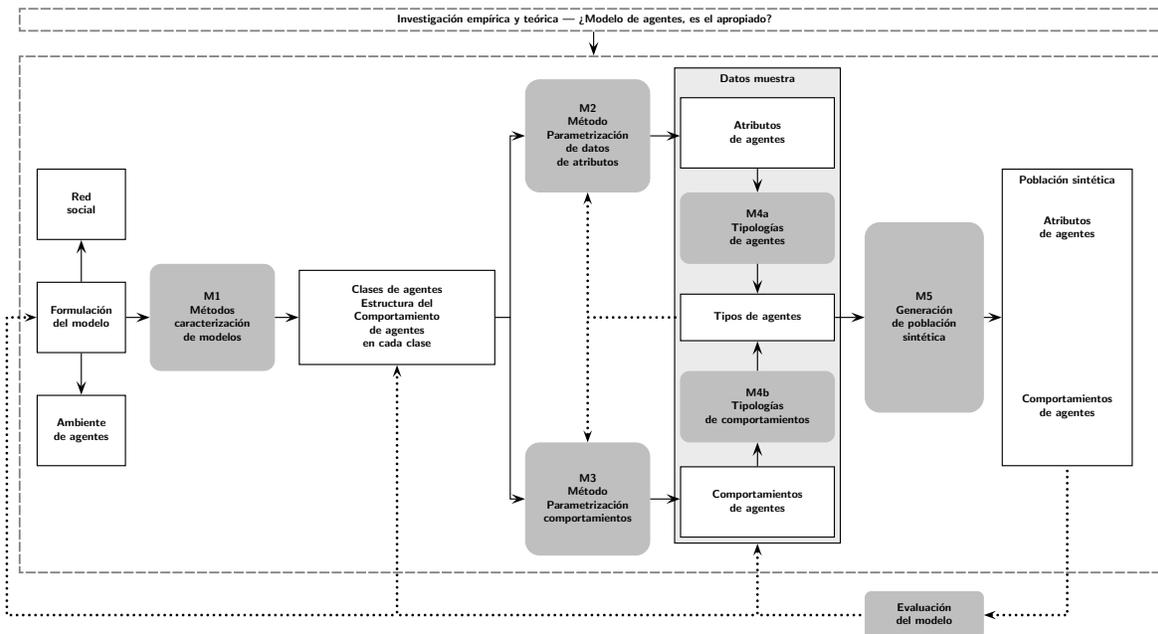


Figura 6.1: Metodología CAP. Adaptado de (Smajgl and Barreteau, 2014), pág. 4.

La metodología CAP se enmarca dentro de la filosofía del modelado empírico, en donde se busca aprovechar la disponibilidad, cada vez mayor, de información acerca de los individuos y las organizaciones. Los registros cada vez más detallados (micro-datos) que están disponibles sobre los seres humanos, sus actividades y comportamientos, especialmente de sus interacciones sociales y profesionales, proveen una fuente de información que no ha sido aprovechada suficientemente para descubrir patrones de comportamiento y desempeño. Cada día es más sencillo obtener información detallada sobre las acciones y productos de entidades como universidades y grupos de investigación.

Todo esto, junto con un aumento continuo de la capacidad de cómputo de las máquinas y con la creación de herramientas de *software* cada vez más sofisticadas y fáciles de usar, ha permitido la aparición de un enfoque inductivo o *bottom-up*, mediante el cual se construyen modelos de sistemas complejos, formados por muchos componentes, mediante la caracterización de los comportamientos de sus partes integrantes y de sus interacciones.

Se han ensayado numerosas formalizaciones de la metodología inductiva entre las cuales la más exitosa, a nuestro juicio, es el marco CAP. Como su nombre lo indica, la

metodología consta de dos etapas: **caracterización** y **parametrización**, a partir de las cuales se construye el modelo empírico. La figura 6.1 resume la metodología, que será explicada en más detalle, a continuación.

Todo el proceso de modelado por agentes debe estar precedido de una etapa durante la cual se estudia el sistema a modelar y se decide cuáles son las características del sistema que el modelo pretende capturar. En el caso que nos ocupa, se pretende estudiar cómo la producción científica de los investigadores en una cierta área del conocimiento se ve afectada por las condiciones de financiación, las interacciones de unos investigadores con otros y en cómo surgen, crecen, decrecen o desaparecen grupos de investigación.

La especificación de un modelo requiere, en primer lugar, la definición de los agentes principales, protagonistas de la dinámica, y de sus interacciones, las cuales regulan las relaciones entre los agentes. Los agentes, que pueden ser de varios tipos, están caracterizados por **atributos**: variables propias de cada individuo y que sirven para distinguir unos de otros. Las interacciones entre agentes son las que dan origen a la dinámica; se formalizan a través de reglas de **comportamiento**.

Durante la etapa de caracterización, se establecen los tipos de agentes a incluir en el modelo; se definen sus atributos, es decir, las características individuales de los agentes que son relevantes porque afectan sus interacciones con otros agentes y con el medio. Una vez definidos los agentes, es necesario especificar cuáles son las dinámicas en las cuales estamos interesados, con el fin de capturar las características del sistema que estamos modelando. Las dinámicas, en realidad, se describen por medio de reglas de comportamiento capaces de explicar la forma como se regulan las interacciones entre agentes y entre éstos y el ambiente. Los métodos usados para hacer la caracterización de los agentes y las estructuras de las reglas de comportamiento, son los que en el diagrama de la figura 6.1 se denominan M1.

Una vez caracterizadas las entidades que conforman el modelo y sus interacciones, procedemos a identificar los parámetros que permiten conectar el modelo abstracto con la respuesta del sistema real que está siendo analizado. Con este fin, se recoge información acerca de los individuos y otras entidades que componen el sistema para definir aspectos exógenos que no deberían ser opciones en el desarrollo del modelo. Así, por ejemplo, si durante la etapa de caracterización se decidió que el tiempo de permanencia de un investigador en el sistema se puede describir por una variable aleatoria, durante el proceso de parametrización es necesario identificar la distribución de probabilidad de estos tiempos, a partir de la información de una muestra de investigadores. Aspectos tales como distribuciones de probabilidad de los tiempos, productividad y patrones de comportamiento deben, entonces, ser identificados a partir de los datos existentes.

Durante la parametrización se obtienen distribuciones de frecuencia de los atributos de los agentes: edad, género, nivel de formación de investigadores; tamaño, categoría, productividad de grupos, etc. También se estiman propiedades de los comportamientos, en función de los atributos individuales y de las condiciones ambientales imperantes. Los métodos disponibles para esta identificación son los que en la figura 6.1 se denotan como M2 y M3.

Cuando todos los atributos y reglas de comportamiento han sido parametrizados, es

necesario definir los tipos de agentes cuyos atributos y comportamientos estén conformes con los que han sido definidos. Para ello, es posible definir clases o familias de agentes para satisfacer esas condiciones; esto se puede realizar definiendo las clases según sus atributos o, más frecuentemente, según sus tipos de comportamientos. Con este propósito se han ideado métodos que permiten generar las clases de agentes; estos métodos son los que aparecen en la figura 6.1 como M4a y M4b.

Finalmente, se requiere generar una **población artificial** o **sintética** cuyas características de atributos y comportamientos coincidan, estadísticamente,<sup>2</sup> con la población que se quiere simular. Esto quiere decir que a partir de los atributos y otros parámetros de la población, que solo son conocidos a nivel agregado o marginal, se debe generar una población que tenga esas características. Dicha población será la que se utilice para efectuar las simulaciones. Otro tanto sucede cuando las características y atributos de la población se conocen solamente a través de una muestra representativa, en cuyo caso se genera una población sintética del tamaño requerido, con distribuciones marginales iguales a las de la muestra. Para generar estas poblaciones sintéticas se utilizan los métodos que en la figura 6.1 se denotan por M5.

En el resto del capítulo haremos uso de la metodología para definir los participantes y procesos y parametrizar las diferentes reglas, distribuciones y otras características. A continuación, generaremos la población sintética cuyas propiedades coinciden con los de la población observada. A partir del modelo así diseñado, simularemos la operación del sistema con el propósito de analizar su desempeño en diferentes condiciones.

### 6.1.3 Participantes y procesos

La dinámica de la investigación, en cualquier lugar del mundo tiene como protagonistas principales a los **investigadores**, que son quienes generan la producción científica y académica. En algunos países la financiación se hace directamente a los investigadores. Sin embargo, en varios países latinoamericanos, la financiación se concede a **grupos de investigación**, los cuales constituyen simplemente la formalización de las relaciones de colaboración de investigadores, su grupo de colaboradores y sus redes.

A partir del modelo usado en Colombia, se clasifican los resultados de las investigaciones en tres componentes fundamentales: productos de **nuevo conocimiento**, que son las publicaciones y patentes resultantes de la investigación; de **formación**, es decir, la educación o entrenamiento de nuevos investigadores a través de maestrías o doctorados y de **apropiación**, como ponencias en eventos, productos que permiten presentar los resultados de la investigación a la sociedad, incluyendo tanto a otros investigadores como a la comunidad en general.

En el modelo se considera que la producción se hace a título individual, mediante la colaboración de varios investigadores. La financiación, en cambio, se concede a los gru-

---

<sup>2</sup>Se conocen varias características a nivel de toda la población, pero no se tiene la distribución conjunta de todas las características. Por ejemplo, se sabe cuál es el porcentaje de hombres y mujeres, de investigadores con pregrado, con Master o Doctorado y las edades y se necesita crear una población grande, cuyos porcentajes satisfagan esas distribuciones.

pos de investigación. Por lo tanto, los investigadores producen (artículos científicos, por ejemplo) en grupos de coautoría, y los grupos de investigación, a su vez, elaboran propuestas de proyectos de investigación y las presentan a las convocatorias. Como resultado de su participación en las convocatorias, los grupos pueden resultar, o no, favorecidos con financiación para su proyecto.

## Investigadores

Para reflejar la estructura de la gestión de la investigación, pero sobre todo con el fin de asimilar la información consignada por los grupos de investigación en las bases de datos que recogen su producción, vamos a considerar dos tipos de investigadores. Se definen los **investigadores líderes** como aquellos que tienen la iniciativa en la producción científica a través de artículos y también son los investigadores principales de los proyectos de investigación. Los demás investigadores son clasificados como **no líderes**; ellos participan en la producción pero no son los que toman la iniciativa de escribir ni de presentar una propuesta de proyecto. El modelo debe considerar la aparición de nuevos investigadores y su eventual desaparición. También se contempla la evolución de los investigadores y su eventual cambio de categoría, para pasar de no líder a líder.

La aparición de nuevos investigadores (su *nacimiento*), se modela por medio de un proceso estocástico que describe el momento en el cual aparece (nace) para empezar a formar parte del proceso y también el momento cuando desaparece (muere). Después de analizar los datos históricos, se concluyó que el proceso de llegada de nuevos investigadores, agrupados por grados académicos, a grupos de investigación, también agrupados por categorías, se puede aproximar en forma suficientemente precisa, por medio de un proceso de Poisson (Bass, 2011), (Yates and Goodman, 1998). Los parámetros de la distribución de probabilidad para cada grupo de investigadores y cada categoría de grupo se identifican a partir de la información histórica.

Para el modelo actual solo se consideran productos de nuevo conocimiento y de formación. Entre los productos de nuevo conocimiento se incluyen artículos científicos, libros resultado de investigaciones y capítulos de libros. La base de datos históricos incluye muy pocas patentes otorgadas en esta área. Por lo tanto, no se incluyeron las patentes en esta versión.

**Creación de productos** Es necesario modelar el proceso que conduce a la creación de un producto tal como un artículo, un libro o una tesis. Para ello se requiere establecer el momento cuando ello ocurre: solo incluimos el instante en que la publicación aparece o, para las tesis, el momento en que ésta se termina, con el grado del estudiante. No hay suficiente información acerca del tiempo requerido para preparar la publicación ni de la escogencia de los coautores. por lo tanto, solamente se simula el instante cuando aparece publicado el trabajo o se termina la tesis. Adicionalmente, puesto que es frecuente que varios productos aparezcan durante el mismo mes, se debe modelar de alguna manera ese número para cuantificar verdaderamente la producción.

La aparición de un nuevo producto también se considera como el resultado de un

proceso estocástico. En el caso de las publicaciones, un investigador líder debe decidir en cada período si en ese período van a aparecer algunas publicaciones. A continuación se debe determinar cuántas aparecerán ese mes; es decir, si va a iniciar la escritura de un artículo ó publicación. En ese sentido se estableció un modelo<sup>3</sup> que permite calcular la probabilidad de que en un período determinado, se dé inicio a la escritura del artículo. El modelo es el resultado de una regresión logística y se puede expresar como:

$$\log \left( \frac{p}{1-p} \right) = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_k x_k + \varepsilon, \quad (6.1)$$

donde  $p$  es la probabilidad de que en el mes bajo consideración se produzca la publicación de un artículo.  $x_1, \dots, x_k$  son variables que condicionan la ocurrencia del evento y que incluyen características personales del investigador líder y de su grupo de investigación. Los coeficientes  $a_0, a_1, \dots, a_k$  se determinan a partir del conjunto de datos de publicaciones. Por último,  $\varepsilon$  es una variable aleatoria que representa el error, con media cero y distribución normal.

En los instantes cuando aparecen nuevos productos, se debe establecer cuántos van a aparecer ese período. Este número sigue una distribución de probabilidad que también va a ser estimada a partir de los datos individuales de los investigadores.

Por último, cuando se produce el evento de iniciar publicación de un artículo, el investigador líder invita a un número determinado de investigadores a colaborar. Desde el punto de vista del modelo, lo único relevante es el número de personas que finalmente participan en la escritura y aparecen como coautores. Este número se determina a partir de la información estadística. En este punto también se debe determinar si los coautores invitados a colaborar son nacionales o extranjeros y, si pertenecen o no al mismo grupo de investigación en el cual trabaja el investigador que lidera la creación.

### Grupos de investigación

Los grupos de investigación están constituidos por un número plural de investigadores, quienes pueden ingresar a un grupo o a varios. Sin embargo, cuando pertenecen a un grupo, la probabilidad de unirse simultáneamente a otro es baja. El momento cuando un investigador decide ingresar, o salir, de un grupo es también una variable aleatoria. Los investigadores pueden también cambiar de grupo y el momento cuando deciden hacer eso está dado por otra variable aleatoria. Las distribuciones de probabilidad de todas estas variables aleatorias se pueden estimar a partir de los datos históricos de los diferentes grupos.

Para efectos del análisis, los grupos de investigación se han clasificado de acuerdo con su tamaño (número de integrantes) y su productividad (número de artículos publicados, por integrante). Por supuesto, los grupos crecen y decrecen por el movimiento de sus investigadores. Adicionalmente, en Colombia se clasifican los grupos de investigación, de

---

<sup>3</sup>Este modelo se desarrolló a partir de un ejercicio inductivo, a partir del análisis del comportamiento de los agentes.

acuerdo con reglas establecidas por Colciencias. Eventualmente, un grupo puede aparecer o desaparecer.

Los grupos de investigación pueden nacer, desaparecer o unirse a otros grupos. También pueden presentar una propuesta a una convocatoria de financiación y, en algunos casos, recibir financiación para adelantar sus investigaciones.

### Supuestos adicionales

Además de las consideraciones anteriores se utilizaron otros supuestos, que se resumen a continuación:

1. Todos los investigadores del sistema pueden publicar y registrar un producto. En este modelo, solo algunos investigadores (líderes) pueden tomar la iniciativa de comenzar a desarrollarlo.
2. Solo los investigadores asociados a un grupo de investigación influyen sobre el sistema. Todas las publicaciones se hacen a través de un grupo de investigación.
3. Los grupos de investigación no registrados en Colciencias no se consideran en el modelo.
4. Los trabajos no publicados (o no registrados) no tienen efecto sobre el sistema. Asimismo, todo trabajo realizado por los investigadores del sistema se publica y se registra en el momento en que se produce, es decir, no hay un retardo para su publicación.<sup>4</sup>
5. Los grupos de investigación solo desaparecen por no cumplir con las características exigidas para ser reconocidos como tales.
6. Durante el proceso de creación de un producto, solo se registran los investigadores que aceptan participar en el trabajo y aparecen finalmente como coautores.
7. No hay un límite en el número de productos en los que un investigador puede estar trabajando simultáneamente.
8. Los investigadores ingresan al sistema con un determinado nivel educativo, el cual no varía durante la ejecución del modelo.<sup>5</sup>
9. Todos los proyectos presentados tienen probabilidad de ser escogidos para su financiación.

---

<sup>4</sup>En realidad esto no representa una limitación; el modelo solo registra el instante en que aparece publicado. El proceso de preparación no se modela. Algo similar ocurre con las tesis.

<sup>5</sup>Esta no es una limitación grave. En la base de datos de Colciencias solo se registra la información sobre la persona que dirigió una tesis, no la de la persona que la realizó. Por lo tanto, no es factible hacer el seguimiento. Además, en el caso de estudios en áreas o lugares —países— no asociados con los grupos incluidos en el modelo, esta información nunca hace parte de los datos que registra el sistema de información sobre la investigación.

## Fuentes de financiación

Se considera que existen dos fuentes alternativas de financiación para la investigación: Colciencias, el ente encargado de fomentar la ciencia y la tecnología en el país, y todas las otras posibles fuentes, agrupadas en una sola. Para los efectos del modelo, se supone que la financiación externa, generalmente de fuentes internacionales, está limitada a los grupos de investigación de mayor tamaño y productividad porque esos son los que suelen tener suficiente capacidad y prestigio como para obtener la financiación o para asociarse con grupos del exterior y acceder a convocatorias de financiación a nivel internacional.

Con el fin de ilustrar las principales características del modelo, se presenta en la figura 6.2, un diagrama que resume el papel de los principales agentes.

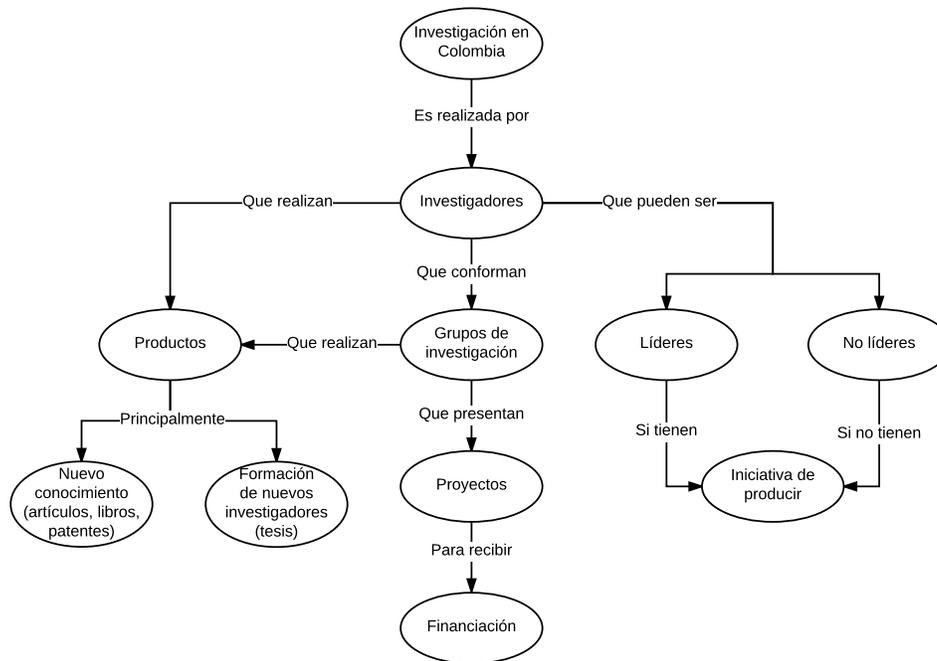


Figura 6.2: Modelo conceptual del sistema.

## 6.2 Implementación

En esta sección describimos la forma como se implementó el modelo, de acuerdo con las premisas del modelo conceptual, descritas en la sección 6.1. Se describen, en primer lugar, las fuentes de información utilizadas y los datos usados para estimar las distribuciones de probabilidad; a continuación se hace una descripción del modelo implementado con sus agentes y reglas.

El modelo fue implementado en la plataforma Netlogo (Wilensky and Evanston, 1999). Se utilizó un incremento de tiempo de un mes.

### 6.2.1 Datos

Las fuentes principales de la información son las bases de datos sobre los proyectos, propuestos y financiados en el área de la salud, la información consignada por los investigadores en el aplicativo CvLAC y los datos de los grupos de investigación del aplicativo GrupLAC, ambos de Colciencias. También se utilizaron fuentes de información de carácter más general como las bases de datos bibliográficas Scopus y Web Of Science.

La información de los grupos de investigación relacionados con malaria fue obtenida de la base de datos GrupLAC, la cual permite el registro de la información básica de los grupos de investigación del país. La base de datos GrupLAC tiene información acerca de las publicaciones (artículos, libros, capítulos de libros), innovaciones (patentes, modelos de utilidad, innovaciones de proceso) y formación de investigadores (tesis de maestría y doctorado terminadas).

Para la realización del modelo se trabajó principalmente con la información consolidada a partir de la base de datos de Colciencias, incluyendo información de los 106 grupos de investigación existentes actualmente, que registran al menos un artículo (producto de nuevo conocimiento), asociado a la malaria. Se obtuvo también la información de los investigadores que han estado vinculados a alguno de estos grupos alguna vez. El total de investigadores que han hecho parte de los 106 grupos es de **4399**, de los cuales 1811 permanecían activos en 2011. Se incluyeron, además, sus publicaciones y las categorías alcanzadas por los grupos, según el modelo de medición de grupos de Colciencias.

Los datos acerca de los proyectos de investigación financiados fueron obtenidos del listado de proyectos evaluados y financiados por el programa Nacional de Ciencia y Tecnología de la Salud del año 2001 al 2011, de Colciencias.

Se decidió incluir todos los grupos que han hecho alguna contribución en el área de malaria, a pesar de que sus líneas principales de investigación sean diferentes por considerar que es necesario cuantificar todos los resultados de la investigación en dicha área. En realidad, en esta área del conocimiento, existen en nuestro país grupos que son muy importantes, productivos y numerosos y los cuales, generalmente, son los más opcionados a recibir financiación. Esto quiere decir que su producción va a tener una participación mucho más significativa en el total del país, pero también es probable que su ejemplo y su prestigio tengan un efecto positivo sobre la productividad de otros grupos, quizá menos especializados. Los grupos de investigación cuya actividad se relaciona solo tangencialmente con la malaria tienen una participación mucho menor y es de esperar que su influencia en los modelos diseñados para caracterizar la relación entre productos de investigación y financiación sea solo marginal. No obstante esa relativa insignificancia, en aras del rigor en el modelado, no parece adecuado excluirlos del análisis de la producción.

Existen otras razones prácticas para no limitar el estudio de la producción a la de grupos cuyo interés fundamental es la malaria: en primer lugar no es muy fácil, excepto para unos pocos grupos muy especializados, decidir cuál es el interés principal de un grupo de investigación y la inclusión o exclusión de un grupo podría en muchos casos convertirse en una decisión subjetiva; en segundo lugar, la contribución de los grupos mejor calificados en la clasificación de Colciencias es mucho mayor que la de otros grupos al conjunto

de productos que estamos considerando. Esto se puede evidenciar en la figura 6.3 donde se presenta la contribución acumulada de los grupos de diferentes categorías a la producción de artículos en el área de malaria.

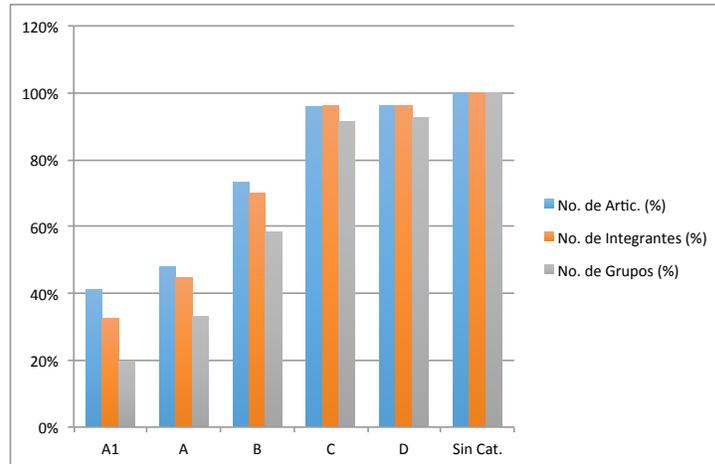


Figura 6.3: Contribuciones relativas de las categorías de grupos de investigación al total. Se muestran los porcentajes acumulados de artículos publicados durante el período 2003-2013, el número de integrantes y el número de grupos

Se puede observar en la figura 6.3 que los grupos de categoría A1, entre los cuales se encuentran todos los grupos destacados del área, constituyen el 20% del total de grupos y tienen el 33% de los investigadores pero contribuyen con el 41% de las publicaciones. Entre las categorías A y B reúnen el 58% de los grupos y el 70% de los investigadores pero hacen una contribución del 73% de las publicaciones. Los grupos de categorías C, D o sin categoría, representan el 42% del número de grupos pero solo contribuyen con el 27% al total de artículos publicados. Teniendo en cuenta que nuestras variables de resultado son cantidades totales producidas, es claro que los grupos de las categorías A y B tienen una mucho mayor contribución a los modelos obtenidos que los grupos de menor categoría.

### 6.2.2 Agentes y población sintética

Los modelos basados en agentes, al igual que los de microsimulación, representan en forma detallada las interacciones de individuos en un ambiente determinado. Puesto que se trata de reproducir los comportamientos de los individuos reales que componen la población, es necesario que los agentes (individuos) artificiales cuyos comportamientos se simulan, coincidan tan cercanamente como sea posible con la población real, tanto en número como en los atributos que son relevantes para el estudio. En teoría, lo ideal sería contar con los datos de la población real. Sin embargo, razones éticas y legales hacen que esa opción no sea recomendable. Por esa razón, se trabaja con una población artificial, o **sintética**.

Se trata, entonces, de generar una población de individuos cuyos atributos sean similares a los de la población original. Sin embargo, las características de la población

solo se conocen a través de las distribuciones marginales. Por ejemplo, se conoce la distribución de probabilidad (frecuencias) de los investigadores por género, nivel educativo, antigüedad en el sistema, etc. Para los grupos de investigación se conoce la distribución de probabilidad del número de integrantes, categoría y productividad.

Este problema de obtener una muestra de individuos de una población de la cual solo se conocen las distribuciones marginales fue estudiado por Deming y Stephan ([Deming and Stephan, 1940](#)). Su método, denominado *Iterative Proportional Fitting*, consiste en tratar de que la población se ajuste lo mejor posible a una sola distribución (variable) cada vez y luego ajustarla de forma iterativa para lograr un ajuste aceptable con respecto a todas las distribuciones marginales (variables). Esta técnica ha sido extensamente usada para generar poblaciones sintéticas en procesos de planeamiento. Ver Beckman *et al.* ([Beckman et al., 1996](#)), por ejemplo.

En el modelo que se plantea, se simula la dinámica de la aparición y desaparición de investigadores y de su asociación con los grupos de investigación. También se trata de simular el proceso creativo que conduce a la generación de publicaciones en una población de investigadores y grupos de investigación, que se asemejen tanto como sea posible, en sus características generales, a la situación real existente en el país en el área de malaria. Por lo tanto, es necesario contar con agentes (investigadores y grupos) cuyas características estadísticas sean tan parecidas a la realidad como sea posible. Esta **Población Sintética** será utilizada en la simulación para representar una colección hipotética de investigadores y grupos cuyo comportamiento es en términos estadísticos igual a la población real, como se describió anteriormente.

Para la generación de las poblaciones sintéticas de grupos de investigación y de investigadores, se utilizó el paquete estadístico **Synthpop**, que hace parte del programa estadístico **R** ([Nowok et al., 2016](#)).

### 6.2.3 Investigadores

Tal como se describió anteriormente, se consideraron dos tipos de investigadores: **líderes** y **no líderes**<sup>6</sup>. Los líderes corresponden a los agentes que registran artículos asociados en la base de datos. Se les asignó el nombre de “líderes” porque en el modelo son quienes toman la iniciativa de comenzar a producir un artículo, libro o patente, enviando un mensaje a un número determinado de investigadores para que estos inicien también la producción. Los investigadores no líderes, en contraposición, son aquellos que se encuentran vinculados a un grupo de investigación pero que no registran publicaciones asociadas en la base de datos, por lo cual, en el modelo no pueden comenzar a producir por iniciativa propia, sino que deben recibir el mensaje de invitación de un investigador líder para hacerlo.

El género de los investigadores se asigna al azar, usando una relación entre hombres y

---

<sup>6</sup>Esta distinción surgió a raíz de una limitación de la base de datos de grupos suministrada por Colciencias, la cual incluye solo a un investigador como responsable de cada producto. La implementación del modelo también se facilita si la iniciativa de crear un producto se limita a los investigadores con mayor producción.

mujeres de 1:1, tal como indican los datos estadísticos recolectados. Otra característica de los investigadores es la posibilidad de pertenecer a varios grupos, lo cual no es una característica común. **Por lo tanto, en el momento de su creación, a cada investigador se le asigna un número de grupos a los cuales pertenecerá.**

### Llegada y permanencia de los investigadores

Los investigadores pueden aparecer y desaparecer del sistema, en forma aleatoria, pero con una cierta regularidad. En realidad, los datos históricos muestran que el número de nuevos investigadores que se incorporan al sistema por año presenta una tendencia creciente, como se ilustra en la figura 6.4. El número de llegadas por año puede ser aproximado de forma adecuada por una curva logística de la forma:

$$N(t) = \frac{L}{1 - e^{-k(t-t_0)}}.$$

Los valores de los parámetros se calcularon por medio de una regresión de mínimos cuadrados y se obtuvieron los valores de  $L = 563.104286$ ,  $k = 0.22431304$  y  $t_0 = 2006.17795$ , resultando así la curva que se presenta en la figura.

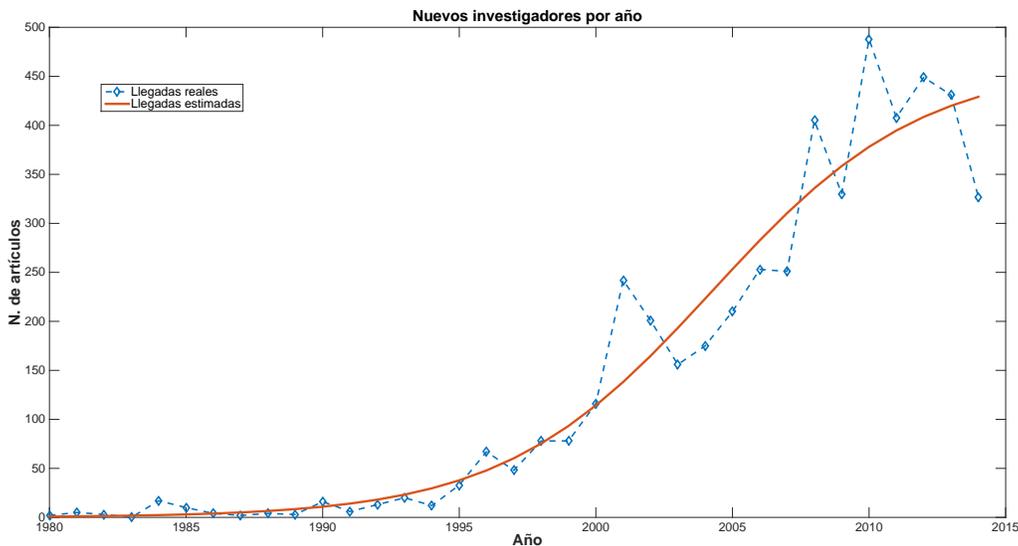


Figura 6.4: Evolución del número de nuevos investigadores por año.

Este modelo logístico aparece como una buena opción, puesto que permite un crecimiento acotado del número de nuevos investigadores y refleja la tendencia reciente que parece ser de crecimiento más lento que en el pasado en el número de nuevos investigadores.

Una vez determinado cuántos investigadores van a ingresar al modelo en un año, es preciso asignarlos a los diferentes meses. Esto se realiza con base en estadísticas acerca

de las llegadas por mes, las cuales son bastante regulares. Entonces, el número anual se reparte proporcionalmente a la probabilidad de que una llegada se produzca en cada mes del año. Como se mencionó anteriormente, estas probabilidades se estiman de los datos históricos.

Cada vez que se crea un investigador, se le asigna un tiempo de vida y, por lo tanto, queda determinado también un tiempo de salida del sistema. Cada período de tiempo (cada mes) se comprueba si el investigador debe salir del modelo (“morir”). El tiempo de vida (la duración de su vinculación como investigador en alguno de los grupos) se puede estimar a partir de los datos históricos acerca de la vinculación de los investigadores. En este caso, la distribución puede aproximarse bastante bien por una distribución exponencial.

También es necesario caracterizar los intervalos que cada investigador permanece como integrante de un grupo. Para ello se evaluaron los períodos de permanencia, usando las fechas de vinculación y desvinculación a los diferentes grupos. En la figura 6.5 se presenta el histograma de probabilidad de los tiempos que permanecen los investigadores vinculados a un grupo de investigación.

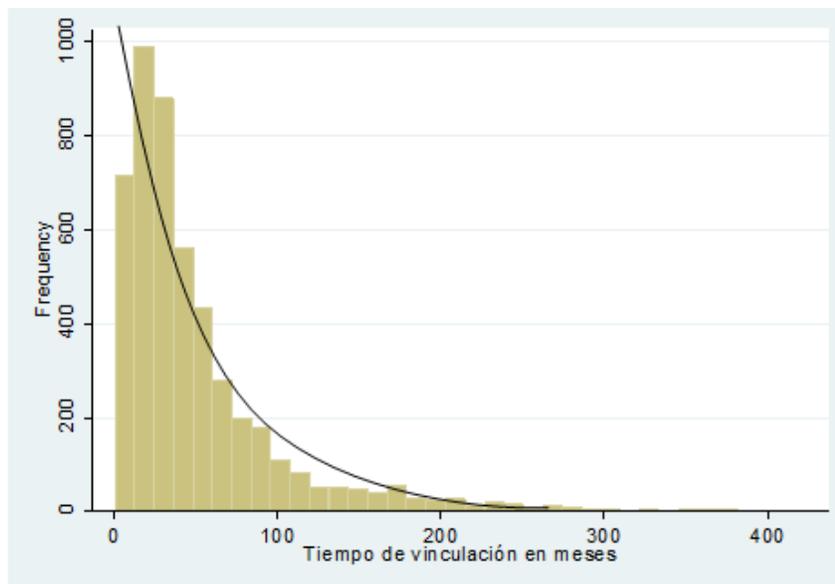


Figura 6.5: Distribución de probabilidad de los tiempos de permanencia en un grupo.

## Productividad

Con el fin de ilustrar el proceso de producción académica por parte de los investigadores, del cual hace parte la selección de los coautores de un producto, se presenta el diagrama de flujo de la figura 6.14 incluida, por facilidad, al final del capítulo.

A pesar de que es poco probable y sujeto a una gran variabilidad el hecho de que un investigador determinado produzca en un mes específico, es posible modelar este proceso de decisión de producir o no producir en un mes dado con un modelo de regresión logística.

A nivel macro se espera que este modelo logre imitar el comportamiento observado en los datos del sistema real. Así, se realizó un modelo de regresión logística de la forma

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = a_0 + a_1 x_1 + \cdots + a_k x_k. \quad (6.2)$$

Es decir, que el logit, el logaritmo de los chances (*odds*) de producir algún producto en un mes, considerado a nivel individual, se puede expresar como una combinación lineal de varios factores.

Inicialmente, se consideró que los factores que podrían afectar dicha decisión eran los siguientes:

1. El total histórico de productos registrados por el investigador
2. El número de productos registrados en los últimos 12 meses por el investigador
3. El número de productos registrados en los últimos 12 meses por los grupos a los que estuviese asociado el investigador
4. El género del investigador
5. El nivel educativo del investigador
6. El tamaño promedio de los grupos a los que el investigador se encuentra asociado
7. La categoría promedio de los grupos a los que el investigador se encuentra asociado
8. El hecho de que el investigador estuviese asociado a un grupo de investigación que recientemente hubiese recibido financiación.

Sin embargo, durante el cálculo de la regresión, se encontró que el tercer ítem (productos de sus grupos en el último año) no era significativo, por lo que se excluyó del modelo. Realizando la regresión con las siete variables restantes, se encontró que todas eran estadísticamente significativas (reportando todas ellas un p-valor menor a 0.001), y que el efecto de todas, excepto el tamaño promedio de los grupos asociados, era positivo (a mayor valor, mayor probabilidad de producir). Una posible explicación para este comportamiento es que, al encontrarse un investigador en un grupo grande, es menos probable que sea específicamente él quien decida realizar un producto, sin afectar esto el hecho de que los grupos grandes suelen ser quienes más producen. Esto tiene como resultado que los integrantes del grupo tengan menos probabilidad de ser autores de productos. En cuanto al género del investigador, se encontró que una investigadora tiene una probabilidad ligeramente mayor que un investigador, de producir un artículo en un mes.

Al comienzo de cada período se determina si cada investigador líder hará o no una publicación durante ese mes. Para ello, se calcula la probabilidad  $p$  de iniciar la producción durante ese mes, a partir de los valores de sus variables, de acuerdo con la ecuación 6.2. Una vez calculado  $p$ , se genera un número aleatorio distribuido uniformemente en el

intervalo  $[0, 1]$ . Si el número es menor que  $p$ , se iniciará la producción; en caso contrario, no.

Una vez que se ha decidido, aplicando el modelo logístico, que en el período actual se hará alguna producción, es necesario decidir cuántos productos serán. Este número también puede escogerse utilizando una distribución empírica de la probabilidad condicional del número del mes, dado que en ese mes habrá producción. De la información disponible en la base de datos se encontró una distribución, mostrada en la figura 6.6

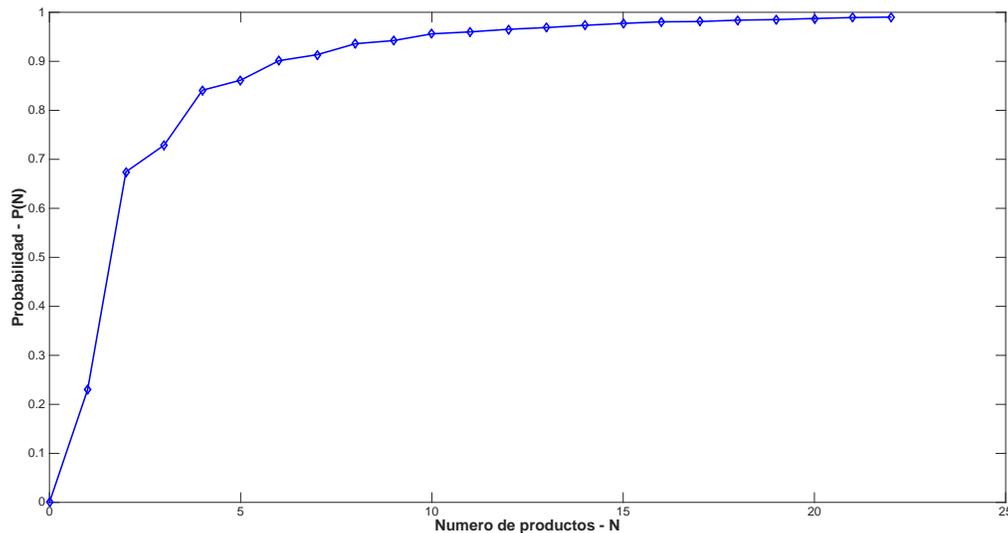


Figura 6.6: Probabilidad condicional acumulada del número de productos en un mes cuando hay producción.

### Asignación del número de coautores

El número de investigadores a quienes un líder envía una invitación para colaborar se genera de forma aleatoria, cada vez que el modelo determina que es el momento de iniciar la publicación de un artículo, de acuerdo con una distribución de probabilidad cuyos parámetros buscan reproducir lo mejor posible la situación real de los productos en el sistema. Los parámetros se estimaron, a partir de información de la base de datos bibliográfica Scopus, para los investigadores que aparecen como autores (líderes) en la información de Colciencias. Se identificaron 968 artículos de Scopus, entre cuyos autores hay al menos uno de los investigadores líderes de la base de datos utilizada.

De igual forma, se encontró una gran variabilidad en el número de autores de los *papers* donde participaron los investigadores líderes, con publicaciones que llegaban a registrar hasta 723 autores. Por lo tanto, fue necesario realizar la exclusión de datos atípicos (*outliers*). Después de analizar límites basados en el rango intercuartílico, se

decidió excluir los trabajos con más de 24 autores. Siguiendo este criterio, se identificaron 48 datos atípicos.

Así pues, trabajando con los 920 datos restantes, se obtuvo la distribución mostrada en la figura 6.7. A continuación, se usó la herramienta de aproximación de distribuciones de probabilidad, disponible en Matlab (dfittool) para encontrar la distribución que mejor se aproxima a los datos. Como resultado se encuentra que una distribución Gamma da una buena aproximación, como se ilustra en la figura.

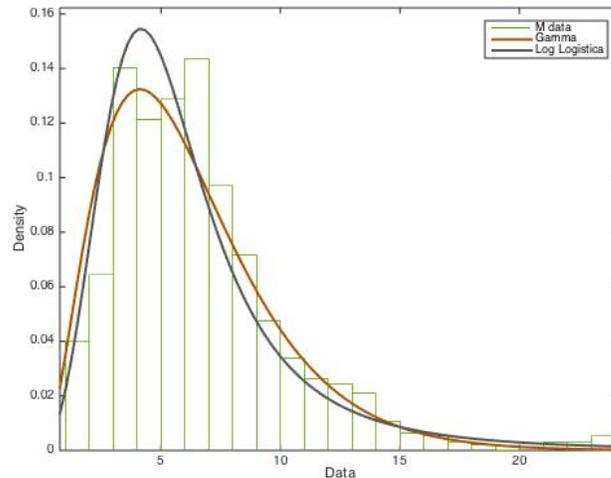


Figura 6.7: Distribución del número de autores de los artículos.

La distribución identificada se usa para producir variables aleatorias que aproximen el número de coautores de una publicación. Cada vez que se da el evento de iniciar una publicación por parte de un investigador líder, se genera uno de esos números aleatorios (digamos,  $n_{aut}$ ) para decidir a cuántas personas va a invitar como coautores. El número de personas invitadas es  $n_{aut} - 1$ .

### Coautores internacionales

Entre los coautores de una publicación, algunos pueden ser extranjeros. En ese caso, sus productos no serán contabilizados dentro del sistema simulado. No obstante, sí es necesario tener en cuenta esa posibilidad para hacer un modelo que aproxime el proceso real de producción intelectual.

La forma como se implementó la decisión de si un coautor es extranjero, es a través de un proceso de selección estocástica tipo Bernoulli: Cada vez que se va a invitar a un investigador a ser coautor de un trabajo, se decide primero si es nacional o extranjero. Con probabilidad  $p_{ext}$  el coautor que se está seleccionando será extranjero; en caso contrario

será nacional. En resumen, los posibles estados son:

$$P_{\text{nacionalidad}} = \begin{cases} p_{ext} & \text{nacionalidad} = \text{extranjero} \\ 1 - p_{ext} & \text{nacionalidad} = \text{colombiano.} \end{cases}$$

En el modelo basado en agentes, esta probabilidad se define por una variable global, denominada `%-international-collaboration`, seleccionable por medio de un *slider*.

### Colaboración intergrupos

Una vez que se ha decidido que un coautor será nacional, existe la posibilidad de que pertenezca a un grupo de investigación diferente al del investigador líder a cargo del desarrollo. Sólo que en este caso, el investigador escogido será uno de los que están activos en el sistema y sus productos sí serán contabilizados.

En el modelo se implementó la decisión de si un coautor es de otro grupo, mediante un proceso de selección estocástica similar al de los extranjeros. Con probabilidad  $p_{otrgrup}$  el coautor que se está seleccionando pertenecerá a otro grupo; en caso contrario será del grupo propio del líder. En resumen, los posibles estados son:

$$P_{\text{grupo}} = \begin{cases} p_{otrgrup} & \text{grupo} = \text{otro} \\ 1 - p_{otrgrup} & \text{grupo} = \text{propio.} \end{cases}$$

Esta probabilidad se implementó por una variable global, denominada `%-intergroup-collaboration`, seleccionable por medio de un *slider*.

### Pertenencia a grupos

La población sintética inicial de investigadores se asigna a los diferentes grupos de acuerdo con el tamaño y conformación de los grupos de la población sintética. Cada grupo debe tener por lo menos un investigador líder y otro investigador.

Cuando un investigador ingresa a un grupo de investigación, se le asigna un tiempo en el cual se va a retirar del mismo. Para ello, se genera un número aleatorio cuya distribución es la de los tiempos de permanencia en el grupo. Cada mes se chequea si le corresponde abandonar el grupo, lo cual ocurre cuando el tiempo actual es mayor o igual al tiempo de retiro.

#### 6.2.4 Grupos de Investigación

En el modelo implementado, los grupos de investigación forman una clase aparte (`breed`, en el modelo `Netlogo`). El número inicial de grupos es arbitrario y se puede seleccionar por el usuario. Para las simulaciones asociadas con el caso de estudio de malaria en Colombia, se escogió el número igual a 106, para aproximar lo mejor posible el modelo a la situación actual en el país en esa área. Las características de los grupos se deben escoger para representar, en la medida de lo posible, las condiciones reales existentes al

## Clasificación por tamaño

Tamaño	Clase	Número de integrantes
Pequeño	1	2 – 10
Medio	2	11 – 20
Grande	3	Más de 20

Tabla 6.1: Categorías de grupos de investigación, según tamaño.

comienzo de la simulación. Esta asignación se hace durante el proceso de generación de la población sintética. En el caso que aquí se presenta, las características de los grupos fueron seleccionadas para aproximar tanto como fuera posible a los grupos reales existentes en Colombia.

Todos los grupos de investigación tienen asociado un conjunto de investigadores. En la implementación, el agente tipo grupo tiene un conjunto de agentes tipo investigador que están asociados a él.

### Dinámica del tamaño

Fueron asignadas tres categorías de tamaño de los grupos: pequeño, medio y grande. Los umbrales que caracterizan esas clases pueden ser asignados por el usuario, de acuerdo con las características de la población. El identificador de la clase a la cual pertenece un grupo, según su tamaño, se va actualizando en la medida en que los investigadores entran y salen del grupo.

En el estudio de caso de la investigación en malaria en Colombia, las categorías de tamaño fueron escogidas como se muestra en la tabla 6.1.

### Productividad y colaboraciones

Para cada grupo se definieron variables que caracterizan la producción y la productividad en términos de nuevos conocimientos (artículos, libros y patentes) y formación de nuevos investigadores (tesis de maestría y doctorado). Para cada grupo, entonces, se almacenan las siguientes variables que acumulan la producción histórica: número de artículos publicados, discriminados por calidad, artículos A1 (publicados en revistas clasificadas como nivel A1) y las demás revistas; número de libros; número de tesis de maestría; número de tesis doctorales; número de patentes y número total de productos. También se conoce el número artículos producidos durante el último mes y el número publicado durante el último año.

Adicionalmente, para adecuar el modelo basado en agentes a las características del modelo de medición de grupos definido por Colciencias, se almacenan todos los productos de nuevo conocimiento y los de formación de investigadores, producidos durante una ventana móvil de tiempo que utiliza el modelo de medición. Esta ventana se conoce como **ventana de observación** en el modelo de Colciencias. La longitud de la ventana de

observación es ajustable.

La productividad del grupo se caracteriza por medio de dos variables definidas como:

**productivity-indicator:** calculado como el número total de productos del grupo, dividido por el número total de investigadores (productos per cápita).

**Average-productivity-indicator:** calculado como el promedio de los indicadores de productividad de los grupos, es decir, cada grupo tiene un indicador de número de productos entre número de integrantes y este indicador se promedia).

La colaboración entre grupos en realidad se lleva a cabo con la tasa de colaboración intergrupos que solamente aparece en la selección de los coautores de una publicación. Por supuesto, el efecto que se trata de simular es el de colaboraciones de miembros de un grupo con los de otro, pero la información sobre el desarrollo de los proyectos es muy escasa y no es suficiente para aventurar ningún modelo. Esta fue la razón por la cual no se incluyó explícitamente el trabajo, solamente el resultado final.

### 6.3 Resultados y análisis de sensibilidad

El modelo se implementó en **Netlogo**, versión 6.0.1. La versión implementada tiene una interfaz que pretende ilustrar la dinámica de la respuesta en el tiempo de las diferentes variables que componen el sistema. El despliegue principal muestra los investigadores, representados por círculos pequeños. Los grupos de investigación se representan por circunferencias cuyo diámetro es proporcional al tamaño del grupo. Los investigadores asociados a un grupo de investigación se dibujan en el interior del grupo al cual pertenecen. Finalmente, cada grupo se localiza en un sistema de coordenadas, calculadas para ilustrar algunas características del grupo:

**Coordenada  $x$ :** es proporcional al número de integrantes del grupo.

**Coordenada  $y$ :** es proporcional al número promedio de los productos que el grupo ha producido durante los últimos doce meses.

En la figura 6.8 está ilustrada la apariencia del despliegue principal del modelo durante una simulación. Nótese que durante la ejecución los grupos con mayor número de integrantes presentan, en promedio, una producción mayor que la de los grupos pequeños (círculos de menor diámetro). Esta es una característica observada permanentemente y que coincide con la información estadística obtenida de la base de datos original.

Además de la gráfica principal, la interfaz gráfica del modelo tiene *sliders* para seleccionar cada uno de los parámetros ajustables del modelo, los cuales comprenden las siguientes variables, identificadas por el nombre que aparece en el *slider*:

- Grupos que aspiran a financiación internacional: `%-international-financing`
- Grupos que presentan proyectos a convocatorias: `%-presented-groups`

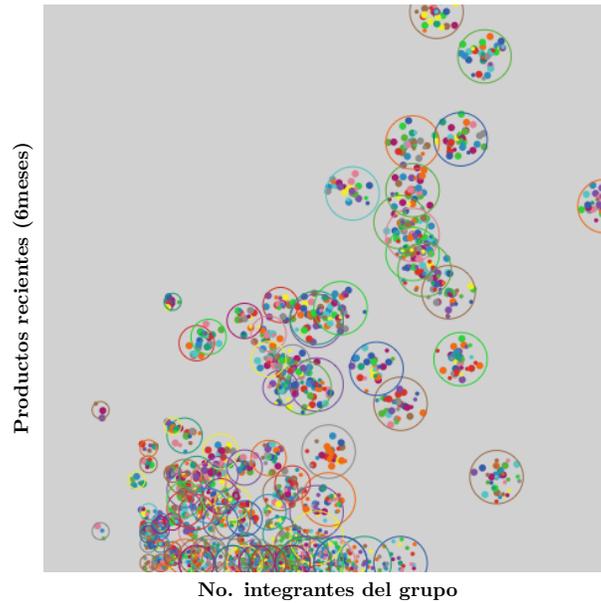


Figura 6.8: Representación de los grupos e investigadores en el modelo ABM.

- Proyectos financiados por convocatoria: `%-financed-projects`
- Número promedio de coautores: `mean-average-collaboration-rate`
- Probabilidad de coautor internacional: `%-international-collaboration`
- Probabilidad de coautor de otro grupo: `%-intergroup-collaboration`

Adicionalmente, la interfaz presenta gráficas de la variación en el tiempo de las diferentes variables. A continuación se muestran once gráficas, las cuales muestran las siguientes variables:

1. Número de investigadores
2. Número de líderes en el sistema
3. El número de investigadores no líderes
4. El número de grupos
5. La producción mensual total
6. El número de investigadores en receso por haber salido de un grupo
7. El número de investigadores que trabajan en un solo grupo
8. El número de investigadores que trabajan, simultáneamente, en dos grupos
9. El número de investigadores que trabajan en tres o más grupos

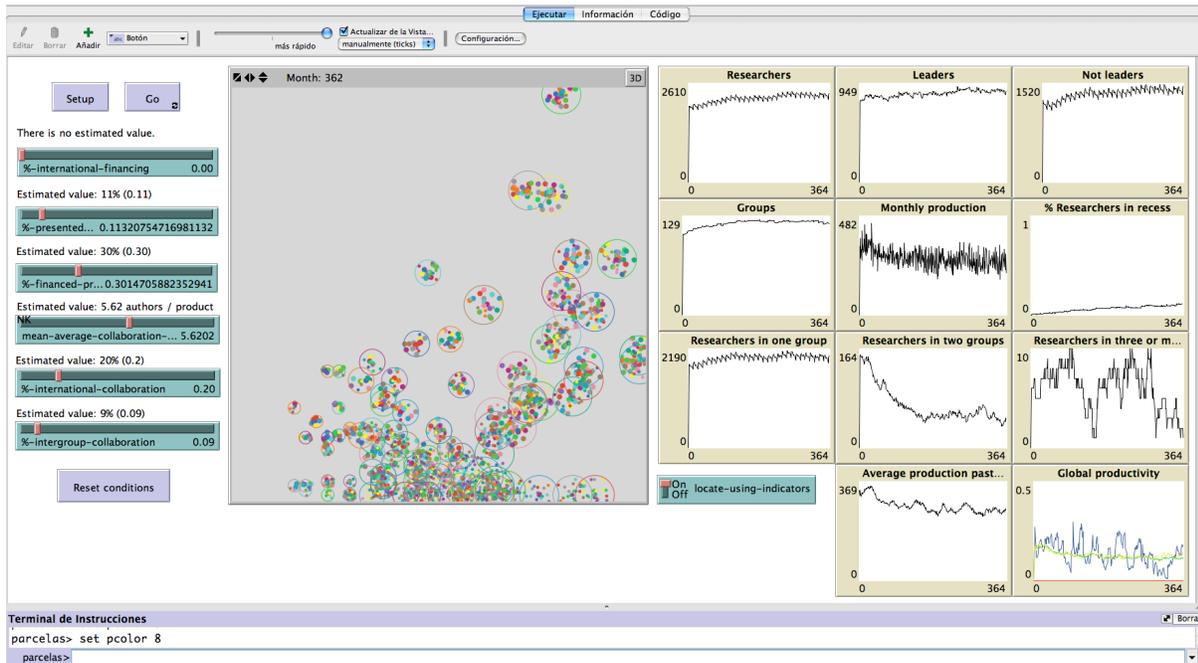


Figura 6.9: Interfaz gráfica del modelo ABM.

10. La producción promedio de los últimos doce meses
11. Una gráfica de productividad, definida como productos por investigador de una cierta categoría. Las categorías incluidas son:
  - (a) Productividad global: todos los investigadores
  - (b) Productividad de investigadores en grupos financiados
  - (c) Productividad de investigadores en grupos que no cuentan con financiación
  - (d) Productividad de investigadores que han sido autores principales alguna vez
  - (e) Productividad de investigadores que solo han servido como coautores

La figura 6.9 muestra una captura de pantalla del modelo durante una simulación.

### 6.3.1 Dinámica de la investigación

El modelo permite simular la evolución dinámica de las características de los grupos de investigación y de los investigadores. Es importante tener en cuenta que numerosas variables pueden ser analizadas para ver su comportamiento en el tiempo. También es posible contar con variables globales que caracterizan comportamientos promedios entre los diferentes agentes o promedios temporales también.

En la figura 6.10, por ejemplo, se presenta un despliegue de la productividad de los diferentes investigadores, según su condición. **En particular, se observa que la productividad de los investigadores en grupos que tienen proyectos financiados**

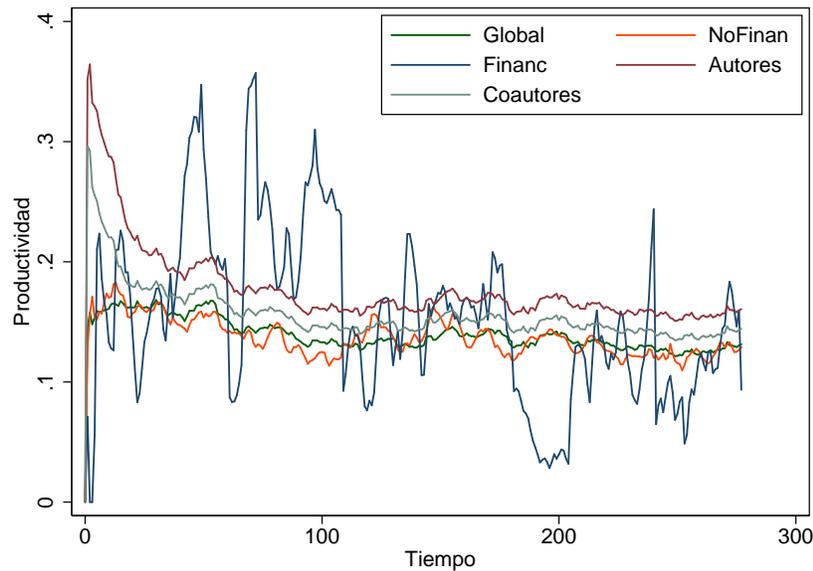


Figura 6.10: Respuesta dinámica de la productividad.

presenta una variabilidad mucho mayor que las de los otros grupos, lo cual es coherente con lo que realmente sucede en el sistema nacional de ciencia y tecnología.

### 6.3.2 Análisis de sensibilidad

El principal medio para utilizar los resultados del modelo de simulación para estudiar el impacto de diferentes políticas de financiación o de otras formas de fomento de la investigación es el **Análizador de comportamiento (Behavior Space** en la versión en inglés). Esta es una herramienta básica de Netlogo para evaluar los resultados de las simulaciones usando diferentes combinaciones de valores de los parámetros. Teniendo en cuenta el carácter estocástico de nuestras simulaciones, es fundamental poder hacer simulaciones repetidas (replicaciones) con el fin de asegurar que los resultados que se obtienen no sean el producto de una combinación afortunada, o desafortunada, de circunstancias azarosas. Por lo tanto, el analizador de comportamiento ejecuta un número de replicaciones de la simulación para cada combinación de valores de los parámetros ajustables.

Esta herramienta permite, por lo tanto, hacer análisis de sensibilidad con respecto a cada uno de los parámetros ajustables o de combinaciones de ellos. En el capítulo 7, acerca del estudio de caso, se aprovechará esta facilidad para analizar los efectos de diferentes políticas de financiación y fomento de la investigación.

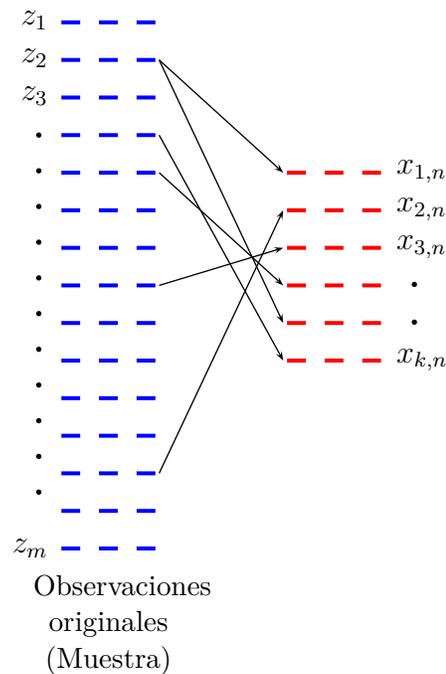


Figura 6.11: Ilustración del concepto de remuestreo.

## 6.4 Análisis de la robustez

La forma estándar actual de evaluar la robustez de las estimaciones de parámetros consiste en hacer simulaciones en forma masiva; es decir, hacer numerosas **replicaciones** para obtener intervalos de confianza adecuados para los parámetros estimados en la obtención del modelo. Las estimaciones se basan en la idea de **remuestreo**, lo cual significa reutilizar los mismos datos para extraer la mayor cantidad de información posible acerca de la población.

### 6.4.1 Remuestreo

En esta sección se describen algunas herramientas de estadística que buscan aprovechar al máximo la información existente en un conjunto de observaciones  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Estos métodos aprovechan la capacidad de cálculo de los computadores modernos para hacer inferencias acerca de la población de la cual fueron obtenidos (muestreados) los datos del conjunto de observaciones. En general se trata de métodos intensivos en cálculos numéricos que pretenden obtener estimaciones robustas de las características de la población. Las técnicas descritas en esta sección pueden consultarse en las referencias ([Chernick et al., 2011](#)) y ([Chernick and LaBudde, 2014](#)).

El elemento básico para las técnicas de remuestreo es la distribución empírica; es decir, una distribución discreta que le da igual ponderación (peso) a cada observación. Eso significa que en un conjunto de  $m$  observaciones, cada una tendría una ponderación de  $1/m$ , lo cual quiere decir que a partir del conjunto de datos original se obtienen, por

muestreo –con remplazo– nuevas *observaciones*.

Supongamos que la muestra original consiste de  $m$  observaciones obtenidas por muestreo de la población y, por lo tanto, uniformemente distribuidas<sup>7</sup> las cuales tienen una distribución de probabilidad que llamaremos  $F_m$ . Sea  $\theta$  la estadística que estamos tratando de estimar;  $\theta$  podría ser, por ejemplo, la media o la mediana de la población. Entonces,  $\theta(F_n)$  es el valor estimado de la estadística, evaluado a partir de la muestra original. Para nuestros propósitos, la estadística de interés va a ser un valor promedio de algún resultado de la simulación. Entonces, el procedimiento de remuestreo se va a utilizar para estimar un intervalo de confianza para esa variable, la cual estimamos a partir de la muestra.

### Submuestreo

En el submuestreo se obtienen nuevas muestras (secundarias o derivadas) a partir de la original, usando un proceso de selección equivalente al de extraer bolas o fichas de una urna; pero cada vez que se extrae una bola, se registra y se vuelve a introducir a la urna (muestreo con remplazo). Entonces, si se obtienen muestras de tamaño  $n$  a partir de una colección de  $m$  observaciones originales, habrá

$$\binom{m}{n} = \frac{n!(m-n)!}{m!}$$

muestras posibles.

Una situación extrema ocurre cuando  $n = m - 1$ , en cuyo caso hay  $m$  submuestras. Este esquema de remuestreo se denomina *Jackknife* y fue propuesto por Quenouille (Quenouille, 1949) y perfeccionado por Tukey (Tukey, 1958).

En el *Jackknife*, entonces, se usan submuestras obtenidas de la muestra original y eliminando una observación cada vez. Para cada una de las submuestras se evalúa la estadística de interés,  $\theta$ , y con esos  $n$  valores obtenidos se estiman intervalos de confianza y otras medidas de la exactitud de la estimación de  $\theta$ .

### 6.4.2 Bootstrap

Cuando las muestras secundarias tienen el mismo tamaño que la muestra original, obtenemos el llamado esquema *Bootstrap*, propuesto por Efron (Efron, 1982). Vamos a ilustrar el método con un ejemplo: supongamos que queremos utilizar los valores de una muestra que originalmente tiene cinco observaciones  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$  y vamos a utilizar esos datos para estimar con mayor confianza algún parámetro de la distribución, por ejemplo la media. Entonces, sacamos varias muestras de tamaño cinco extrayendo valores de los datos originales y formando nuevas muestras. Si queremos  $B = 100$  muestras<sup>8</sup>, el

<sup>7</sup>Su distribución es la de la población, la cual denominamos  $F$ .

<sup>8</sup>Para el esquema *bootstrap*, el número de muestras secundarias se suele notar como  $m =: B$ .

proceso daría un esquema similar al siguiente:

$$\begin{aligned} X_1^* &= [x_3 \ x_2 \ x_3 \ x_5 \ x_4] \\ X_2^* &= [x_5 \ x_3 \ x_3 \ x_5 \ x_3] \\ X_3^* &= [x_1 \ x_3 \ x_2 \ x_3 \ x_3] \\ &\vdots \\ X_{100}^* &= [x_4 \ x_5 \ x_2 \ x_4 \ x_1]. \end{aligned}$$

En la práctica la muestra original no sería tan pequeña, si ello es posible; pero eso depende del problema. Para nuestros fines las muestras se obtienen por replicación de las simulaciones y pueden usarse muestras tan grandes como lo permita la complejidad y la duración de las mismas.

Usando la técnica *bootstrap*, es posible estimar intervalos de confianza. Para ello existen varias posibilidades, dependiendo de las suposiciones que uno esté dispuesto a aceptar. A continuación se presentan dos alternativas.

En el caso que nos ocupa, se utiliza el modelo basado en agentes para generar la muestra original. Esto significa que la muestra original es el resultado de  $m$  replicaciones de la simulación. Queremos obtener estimaciones robustas del valor medio de una de las variables,  $x$ , que usamos como indicadores de desempeño del sistema; por ejemplo,  $x$  puede representar la producción promedio del último año de la simulación, bajo las condiciones especificadas. En este caso, la estadística de interés es  $\theta = \text{mean}(x)$  donde la media se toma entre los valores de  $x_i$  obtenidos en la  $i$ -ésima replicación.

Si es válido suponer que la estadística de interés tiene distribución normal pero no existe ninguna forma analítica de calcular su desviación estándar (como es el caso de la mediana y de muchas otras estadísticas), se puede utilizar el siguiente procedimiento, en el cual solo se utiliza el *bootstrap* para calcular la desviación estándar.

La estimación de un intervalo de confianza para  $\theta$ , entonces se puede resumir así:

### Método *bootstrap* – Aproximación normal

1. Efectuar  $m$  replicaciones de la simulación, con los parámetros especificados.
2. Para  $k = 1 : B$ 
  - (a) Obtener una muestra de tamaño  $m$  (con remplazo) de los  $m$  valores resultantes de la simulación.
  - (b) Calcular la estadística  $\theta$  para la muestra,  $\hat{\theta}_k^*$
  - (c) Almacenar el valor de  $\hat{\theta}_k^*$
3. Para cada muestra secundaria  $X_i^*$ , calcular  $\hat{\theta}_i^*$ .
4. La estimación por *bootstrap* de la desviación estándar,  $\sigma_{\hat{\theta}}$  de  $\hat{\theta}$  es la desviación estándar de  $\hat{\theta}_i^*$ .

5. Calcular el intervalo de confianza usando la ecuación estándar,

$$\hat{\theta} \pm z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}}.$$

Cuando la suposición de normalidad no es adecuada, se puede utilizar el llamado método de percentiles, el cual solamente se basa en la suposición de que la distribución de probabilidad de la estadística  $\theta$ , resultante del *bootstrap*, es una buena aproximación de la verdadera distribución de muestreo. En este caso, solo se necesita ordenar los valores estimados,  $\hat{\theta}_i^*$ , en orden ascendente y seleccionar los valores que corresponden a los percentiles  $\alpha/2$  y  $100 - \alpha/2$  (percentiles 2.5 % y 97.5 %, si  $\alpha = 0.05$ ). La estimación de un intervalo de confianza para  $\theta$ , entonces se puede resumir así:

### Método *bootstrap* – Percentiles

1. Efectuar  $m$  replicaciones de la simulación, con los parámetros especificados.
2. Para  $k = 1 : B$ 
  - (a) Obtener una muestra de tamaño  $m$  (con remplazo) de los  $m$  valores resultantes de la simulación.
  - (b) Calcular la estadística  $\theta$  para la muestra,  $\hat{\theta}_k^*$
  - (c) Almacenar el valor de  $\hat{\theta}_k^*$
3. Ordenar los valores  $\hat{\theta}_k^*$  en orden ascendente. El resultado se puede escribir como:

$$\{\hat{\theta}_1^* \leq \hat{\theta}_2^* \leq \hat{\theta}_3^* \leq \dots \leq \hat{\theta}_B^*\}.$$

4. Definir límites  $lo = \text{ROUND}(\alpha B/2)$  y  $hi = B - lo$ .
5. Calcular el intervalo de confianza como:

$$\left( \hat{\theta}_{(lo+1)}^*, \hat{\theta}_{(hi+1)}^* \right).$$

### Aplicación

En este caso, se realizaron  $m = 100$  replicaciones de la simulación, para cada combinación de parámetros externos. Para cada caso, se calcularon las siguientes variables que caracterizan el desempeño:

$\bar{p}_t$ : El valor promedio de la producción de artículos de los últimos doce meses.

$\bar{\pi}_t$ : La productividad promedio de los grupos, durante los últimos doce meses.

Para cada una de esas variables se obtuvo un intervalo de confianza para su valor promedio, usando un procedimiento *bootstrap*, con  $B = 1000$ . El valor estimado para  $p_t$ , el número de productos mensuales, promediado durante 12 meses es 290.2967, con un intervalo de confianza de (286.8, 293.6), al nivel de confianza del 95 %.

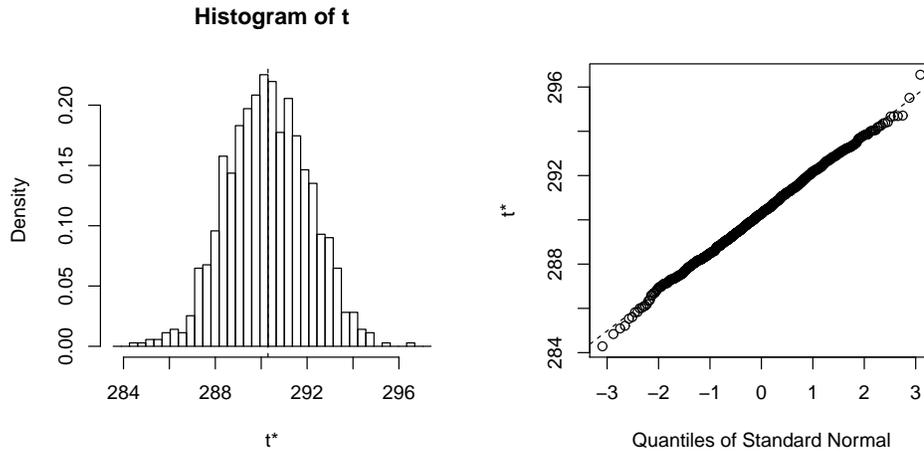


Figura 6.12: Histograma de frecuencias y gráfica de ajuste a una distribución normal (*qq-plot*).

Bootstrap Statistics			
	original	bias	std. error
$t_1^*$	290.2967	0.007736667	1.77495

Para ilustración, en la figura 6.12, se muestra el histograma de frecuencias y un norm-plot (gráfica de ajuste a una distribución normal, también llamada *qq-plot*) de los valores de la producción media de doce meses para el caso en que el porcentaje de proyectos aprobados en una convocatoria anual sea de 20 %.

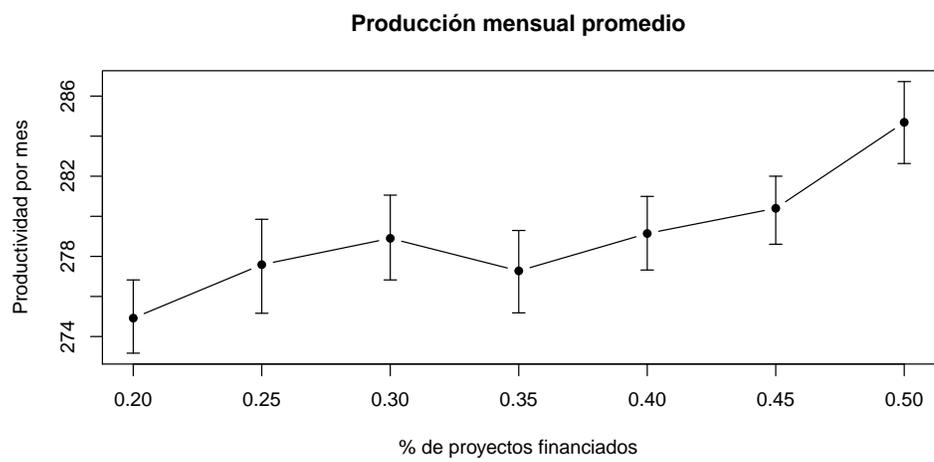


Figura 6.13: Producción mensual vs. porcentaje de proyectos financiados.

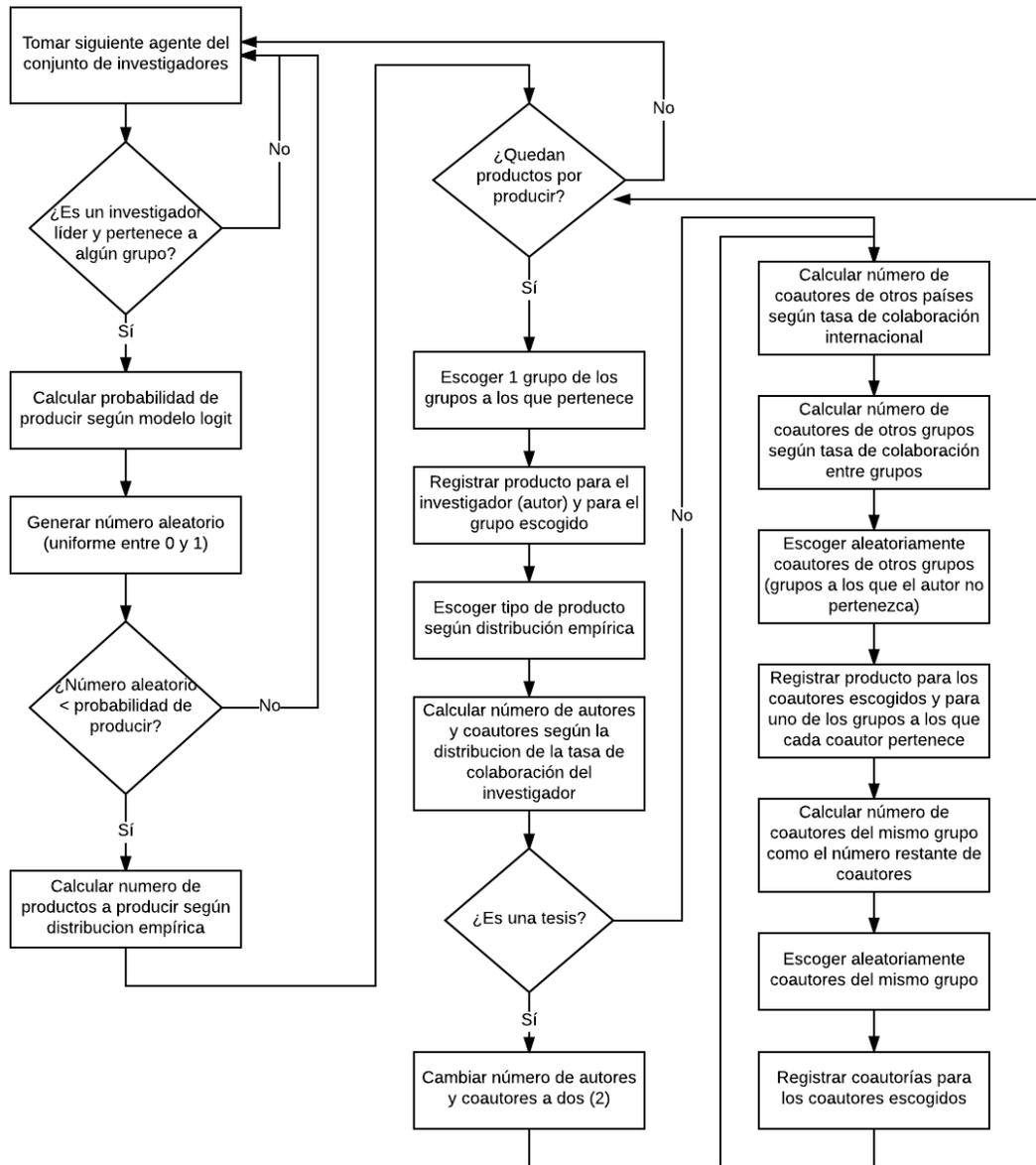


Figura 6.14: Diagrama de flujo del proceso para asignación del número de coautores.



# Capítulo 7

## Estudio de caso: Financiación de la investigación en malaria en Colombia

El estudio de caso es un método valioso de investigación que permite registrar y analizar comportamientos de variables involucradas en el fenómeno estudiado. Los estudios de caso analizan profundamente una unidad para responder al planteamiento del problema, contrastar hipótesis o desarrollar alguna teoría (Eisenhardt, 1989).

La evolución que han tenido los estudios de caso en los últimos años los ubican como un método que se fundamenta en un diseño con un protocolo de investigación específico. En ese sentido se ha tomado en este trabajo la definición de estudio de caso de Robert Yin, quien considera que se trata de una investigación empírica que estudia un fenómeno contemporáneo, dentro de su contexto de vida real, específicamente cuando los límites entre el fenómeno y el contexto no son claramente evidentes (Yin, 1981).

Con el fin de evaluar las técnicas descritas anteriormente para la evaluación de inversiones en investigación, se diseñó un estudio de caso. Este se desarrolla sobre los proyectos financiados por Colciencias en Malaria en el Programa de Ciencia y Tecnología de la Salud entre los años 2000 y 2013.

La malaria es una enfermedad infecciosa causada por un parásito del género *Plasmodium*. Típicamente, es transmitida a los seres humanos cuando son picados por un mosquito infectado (vector) del género *Anopheles*. El parásito tiene un ciclo reproductivo complejo que incluye etapas sexuales y asexuales de reproducción tanto en el vector como en el ser humano. Durante las etapas que ocurren en el humano, se pueden producir síntomas severos e incluso la muerte de la persona infectada. Existen varios tratamientos que pueden eliminar la infección mediante aplicación de medicamentos, pero éstos pueden tener efectos colaterales severos. Actualmente no existe ninguna vacuna efectiva, aunque se investigan varios posibles candidatos. De estas vacunas prospectivas, algunas se han desarrollado o están en desarrollo en Colombia.

Esta enfermedad representa una amenaza severa para la salud en la mayoría de los países tropicales. Cerca de 3200 millones de personas (casi la mitad de la población mundial) viven en contacto con la malaria y, en 2015, se registraron 214 millones de casos en el mundo. Estos, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), ocasionaron

al menos 438 mil muertes. Más de dos tercios de esas muertes (70 %) corresponden a niños de cinco años o menos.

Sin embargo, las perspectivas son optimistas porque, de acuerdo con la OMS, más de la mitad (57 %) de los 106 países donde la malaria era endémica en 2000 han logrado reducciones del número de casos de al menos 75 % en 2015. Estas reducciones han sido el resultado de esfuerzos de prevención de epidemias y de intervenciones de control desarrollados a través del trabajo conjunto de acciones gubernamentales y privadas.

Por contraste, en Colombia, según el Instituto Nacional de Salud<sup>1</sup>, la tasa de morbilidad<sup>2</sup> a nivel nacional muestra una tendencia creciente durante los tres últimos años. En la primera década del siglo XXI, se registraron brotes importantes que llegaron a 230,000 en 2001. De 2000 a 2008 se registraron más de 100,000 casos cada año. A partir de 2010 los casos se redujeron hasta llegar a 41,000 casos en 2014. Sin embargo, desde entonces, se muestra una tendencia creciente que parece estar acentuándose. En la figura 7.1 se puede observar la evolución de la epidemia en el país. Los datos mostrados en la figura son datos oficiales, aunque hay información no oficial que confirma la tendencia reciente.

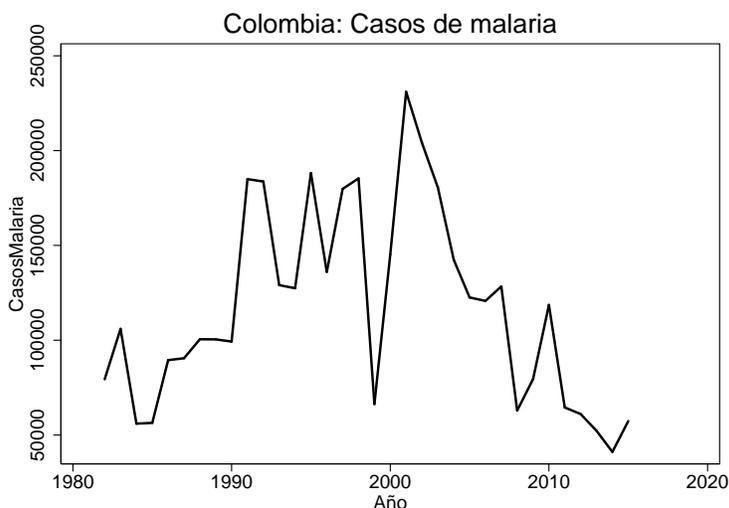


Figura 7.1: Casos de malaria en Colombia.

La investigación en malaria ha ocupado un lugar importante en Colombia con investigadores destacados en el campo de desarrollo de vacunas y en las implicaciones sociales de la epidemia. Una fracción importante de los fondos nacionales para la financiación de la investigación han sido destinados a esta área. En consecuencia, es deseable una evaluación del impacto de estas inversiones, con el fin de servir de criterio para el diseño de políticas públicas futuras de financiación de la investigación.

<sup>1</sup>[www/ins.gov.co/](http://www/ins.gov.co/)

<sup>2</sup>*Morbilidad* se refiere al estado de una persona cuando se encuentra enferma; la tasa de morbilidad es la fracción de la población que padece la enfermedad en un momento determinado.

## 7.1 Protocolo del estudio de caso

El diseño del estudio de caso se realiza teniendo en cuenta la guía metodológica establecida por R. Yin, quien diseña para ello un proceso secuencial, pero iterativo, con las siguientes fases (Yin, 2013):

1. Establecimiento de los objetivos del estudio de caso
2. Identificación de la Unidad de Análisis
3. Planteamiento de las Proposiciones
4. Vinculación lógica de los datos a las proposiciones (estudio cognitivo)
5. Estrategia analítica e interpretación de los datos (estudio analítico).

### 7.1.1 Objetivos del estudio de caso

Como se expresó anteriormente, el estudio de caso tiene varios objetivos:

- Recolectar y homogenizar la información acerca de la financiación de los proyectos de investigación en malaria en Colombia.
- Caracterizar la dinámica de la investigación en malaria en el país.
- Identificar relaciones que ilustren la dinámica del proceso de investigación.
- Validar los modelos de evaluación de impacto diseñados.

### 7.1.2 Unidad de análisis

La Unidad de Análisis considerada es la comunidad de investigación en el área de malaria en Colombia. En esta comunidad están comprendidos los grupos de investigación y los investigadores con interés en temas relacionados con la malaria (En el país hay 106 grupos de investigación que tienen algún producto, de nuevo conocimiento, relacionado con la malaria).

En Colombia la financiación de proyectos de investigación se concede a grupos de investigación en vez de a investigadores individuales. Un **grupo de investigación** se define como: “Un grupo de personas interactuando para hacer investigación y para generar productos de nuevo conocimiento en una o más áreas de estudio, de acuerdo con un plan de trabajo”. Un grupo de investigación es reconocido como tal cuando sus integrantes pueden demostrar, en forma continuada, productos verificables como resultado de sus proyectos y otras actividades asociadas con sus planes de trabajo (Colciencias, 2015).

### 7.1.3 Propositiones

Nuestra investigación busca dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál ha sido el impacto de las inversiones de Colciencias en proyectos de I+D en malaria en Colombia?
- ¿Cómo evaluar, en forma *ex ante*, los impactos esperados de la financiación de proyectos de I+D en el área de malaria?

La formulación de las preguntas de investigación se constituyó en un insumo fundamental para plantear las siguientes proposiciones, las cuales tienen como propósito llamar la atención sobre aspectos claves de la financiación de proyectos de I+D:

- La producción académica y científica que genera un grupo de investigación en un tiempo determinado depende fuertemente de la producción realizada en el pasado. Esto, por supuesto, es un reconocimiento del hecho de que la producción científica, medida de la forma que sea, en número de publicaciones o invenciones (cuantificada en número de patentes, por ejemplo) es realmente un proceso acumulativo. (se evidenció con los análisis de autocorrelación y correlación cruzada)
- La financiación de proyectos de investigación induce comportamientos y cambios de actitud en investigadores e instituciones de investigación fortaleciendo la construcción de capacidades científicas y tecnológicas. (se evidencia con cambios estructurales)
- La financiación en cada instante de tiempo podría estar influenciada por los resultados obtenidos en los proyectos de investigación. (se evidenció con el modelo VAR)

### 7.1.4 Datos

La información de los grupos de investigación identificados como relacionados con malaria fue obtenida de la base de datos GrupLAC, aplicativo de Colciencias que permite el registro de la información básica de los grupos de investigación del país.

La base de datos GrupLAC tiene información acerca de las publicaciones (artículos, libros, capítulos de libros), innovaciones (patentes, modelos de utilidad, innovaciones de proceso) y formación de investigadores (tesis de maestría y doctorado). Las bases de datos fueron complementadas con información encontrada en el CvLAC, aplicativo de Colciencias para registrar la información básica de las hojas de vida de los investigadores y con información de la base de datos de Scopus, la cual registra información de publicaciones.

Con el fin de identificar los grupos de investigación con algún interés directo o indirecto con la malaria, se efectuó una búsqueda adicional de grupos de investigación en GrupLAC. Como palabras clave para la búsqueda se utilizaron los siguientes términos, todos relacionados con malaria: Malaria, Paludism, Paludismo, Plasmodium, Plasmodium Vivax, Plasmodium Falciparum, Plasmodium Malariae, Plasmodium Ovale, Anopheles,

Anofeles, Artemisinine, Quinine, Pyrimethanine, Cloroquine, Sulfadoxine, Artemisinina, Quinina, Pyrimetanina, Cloroquina y Sulfadoxina.

Como resultado se encontraron 106 grupos colombianos que han realizado algún proyecto o publicado algún documento o artículo asociados con malaria. Los campos de investigación incluyen estudios clínicos y sociales, investigación básica para el desarrollo de vacunas, estudios de aparición de resistencia de los parásitos a medicamentos, desarrollo de nuevos medicamentos para control del parásito, modelado matemático de epidemias, etc. Una fracción significativa del conjunto de todos los grupos están asociados con dos universidades y con el Instituto Nacional de Salud.

Se observa que el 85 % de los grupos están concentrados en tres regiones: Bogotá, Eje Cafetero y la Región Pacífica y específicamente en tres departamentos: Bogotá D.C., Antioquia y Valle, tal como se muestra en la figura 7.2.

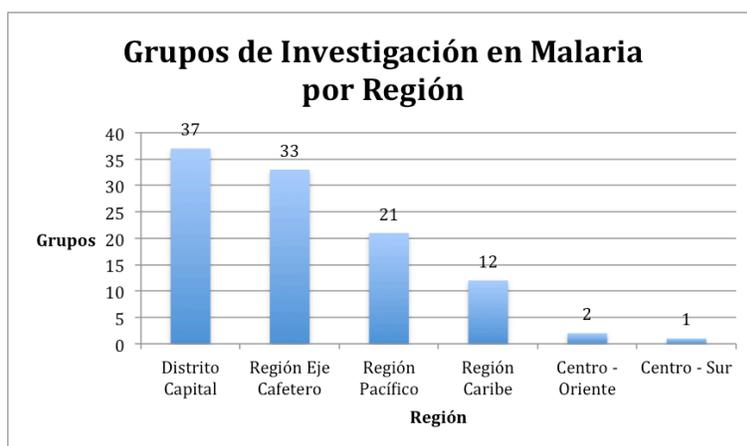


Figura 7.2: Distribución de los grupos de investigación por regiones.

Tal como se observa en la figura 7.3, el 78 % de los grupos de investigación en malaria se concentran principalmente en medicina clínica, ciencias biológicas, ciencias de la salud y ciencias químicas.

En la figura 7.4 se presentan los grupos de investigación categorizados según el modelo de medición de Colciencias, aplicado en 2011. El 33 % de los grupos de investigación en malaria en el país se encuentran en la categoría A1 o A de Colciencias, que corresponden a los que presentan una mayor productividad académica y científica. El 25 % pertenece a la siguiente categoría, que es la B. También cabe anotar que otro 33 % de los grupos están en categoría C, correspondiente a los de menor productividad.

La caracterización de los grupos de investigación se realiza teniendo en cuenta, principalmente, las características de sus integrantes y su producción académica y científica, esta última dada por la cantidad generada de productos de nuevo conocimiento, de formación y de apropiación.

En primer lugar, analizamos la relación entre la categoría, según el modelo de medición aplicado en 2011 y el tamaño del grupo. Se definieron como grupos grandes los que tienen

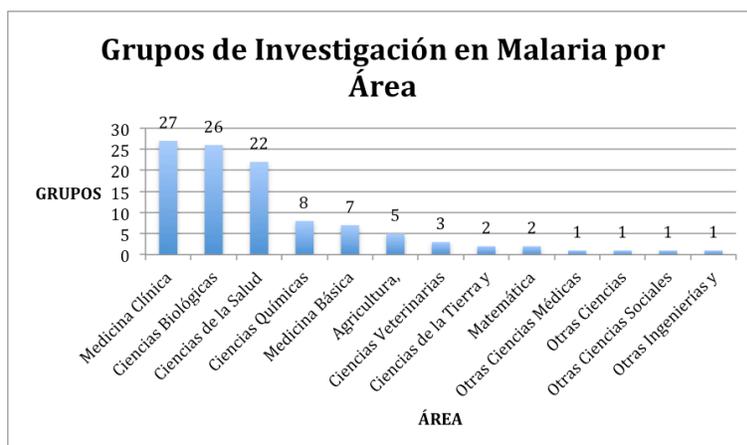


Figura 7.3: Distribución de los grupos de investigación por áreas de conocimiento.

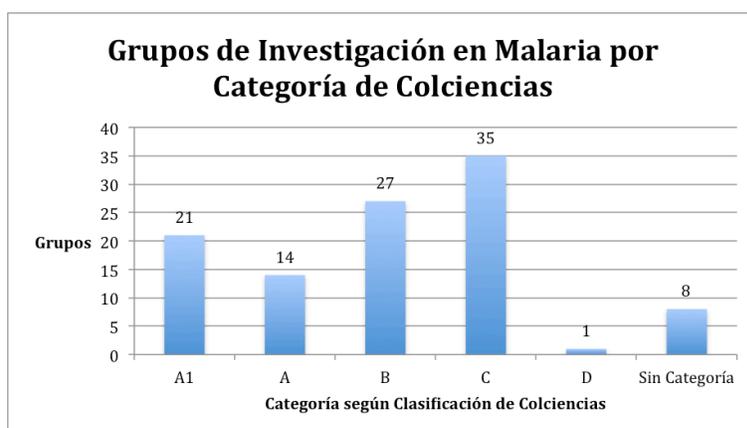


Figura 7.4: Distribución de los grupos de investigación por categoría, según clasificación de Colciencias.

más de 20 integrantes, medianos entre 10 y 19 participantes; los demás son pequeños. La figura 7.5 muestra dicha relación. En las columnas se muestran las categorías, con un ancho de columna proporcional al número de grupos en la categoría correspondiente. La altura de cada parte de una columna indica la fracción de los grupos de cada categoría de un tamaño dado. Claramente se observa la importancia que tiene el tamaño del grupo sobre la categoría: más del 50 % de los grupos A1 son grandes y ninguno es pequeño. En cambio casi el 80 % de los grupos categoría D o no clasificados son grupos pequeños. Esta figura ilustra el sesgo que el modelo de medición ha introducido en la conformación de los grupos.

Con respecto a los integrantes que conforman un grupo se realizó la caracterización según el nivel de formación alcanzado: pregrado, maestría o especialidad médica y doctorado, tal como se presenta en la figura 7.6. En dicha figura se muestra el número de

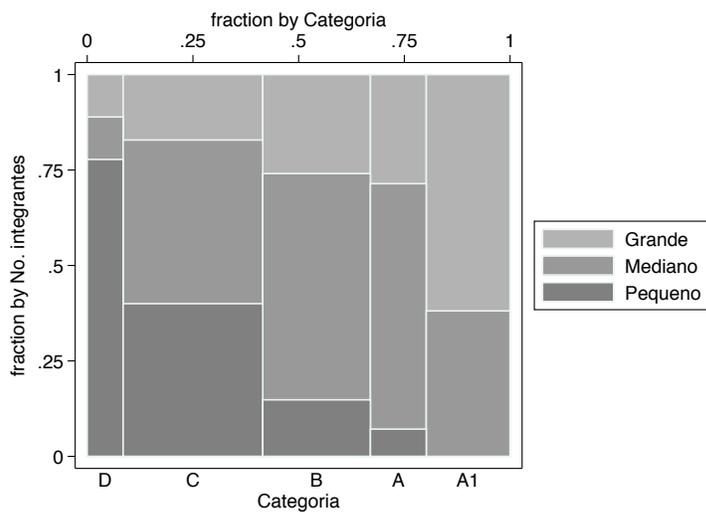


Figura 7.5: Relación entre número de integrantes y categoría según modelo de medición.

investigadores pertenecientes a alguno de los 106 grupos de investigación hasta el mes de enero de 2015. Se observa una tendencia creciente que se mantiene hasta el año 2012, a partir del cual el crecimiento comienza a ser menor, hasta el punto que, en el año 2014, se empieza a observar una tendencia decreciente. De manera más detallada, se puede apreciar cómo la cantidad de doctores, al igual que la de magísteres, deja de crecer aproximadamente desde el año 2010, llegando incluso a disminuir después del año 2012. Conviene resaltar también a los investigadores de pregrado y de otros niveles educativos, pues aunque presentan un comportamiento similar en este período, permiten evidenciar de mejor manera la drástica disminución que se presenta en el año 2014.

De otra parte, la información acerca de los proyectos de investigación financiados fue obtenida de la base de datos de proyectos evaluados y financiados por el programa Nacional de Ciencia y Tecnología de la Salud de Colciencias.

Se construyeron series de tiempo con todos los artículos, libros y capítulos de libros publicados y estudiantes de doctorado graduados como parte de alguno de los 106 grupos. También se obtuvo una serie de tiempo con la cantidad de dinero adjudicado para financiar proyectos por parte del Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología Colciencias. Se encontró que el número de patentes e innovaciones en esta área es despreciable por lo cual no se continuó con el análisis de esa información. Todos los datos presentados aquí son números agregados que representan el total de la producción nacional en el área de malaria durante el período de estudio.

Finalmente, se obtuvo una serie de datos de los casos de malaria reportados en Colombia, a partir de 1988. La serie fue sintetizada a partir de dos fuentes: usamos una serie con valores anuales disponible en el banco de datos del Banco Mundial. Estos datos, anuales, se repartieron por trimestres teniendo en cuenta la contribución histórica promedio de cada trimestre al total de casos anuales, aunque los datos del Banco mundial están

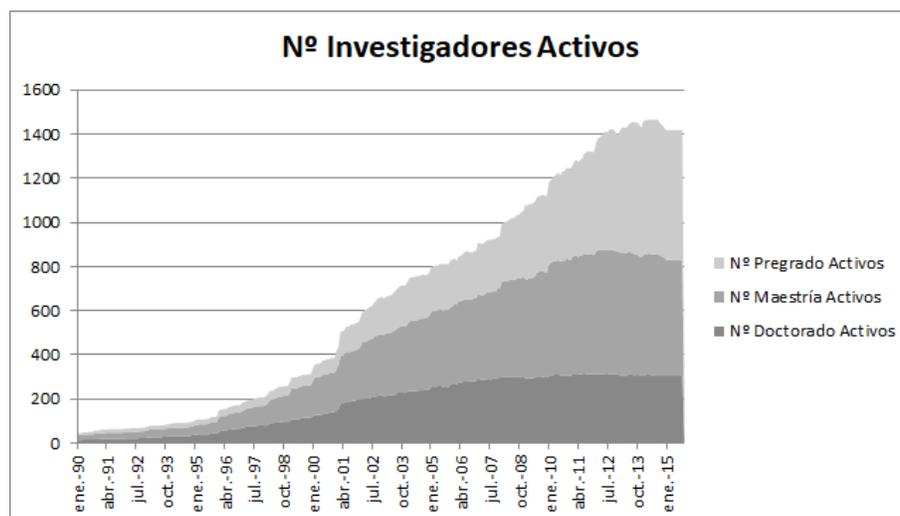


Figura 7.6: Número de investigadores activos por nivel de formación.

disponibles desde 1980, para los distintos análisis solo se usaron a partir de 2000, hasta 2007, es decir, el período no comprendido en la base de datos de vigilancia epidemiológica. Por otra parte, utilizamos una serie de datos, disponible desde el año 2008 en el sistema SISPRO del Ministerio de la Protección Social de Colombia, la cual contiene datos de casos reportados semanalmente en el sistema Sivigila del Instituto Nacional de Salud. A partir de estos datos, se construyeron series trimestrales, puesto que esta es la periodicidad con la cual se disponía de los datos de publicaciones, de producción y de financiación. Se tomaron trimestres de 13 semanas y para los años en los que hubo reportes de la semana epidemiológica 53, estos datos se sumaron al cuarto trimestre.

Adicionalmente, con el fin de contrastar los resultados encontrados en los modelos, se realizaron cuatro entrevistas abiertas, cuyos resultados se describen en el numeral 7.4.

### 7.1.5 Estrategia analítica e interpretación de los datos

La estrategia analítica es el desarrollo del estudio de caso único con el fin de comprender la dinámica presente en la financiación de la investigación en malaria en el país.

Para ello, en la sección 7.2 se describen las series de tiempo construidas y se aplican diversas herramientas estadísticas específicas y en la sección 7.3 se describen los resultados del modelo basado en agentes diseñado. Esto con el fin de realizar triangulación metodológica para contrastar los resultados con las proposiciones y para validar los modelos diseñados. De hecho, como se evidencia en las secciones 7.2 y 7.3 las proposiciones fueron validadas usando la técnica de *Pattern Matching*, descrita por Robert Yin (Yin, 1981), (Gerring, 2017).

- La producción académica y científica que genera un grupo de investigación en un tiempo determinado depende fuertemente de la producción realizada en el pasa-

do. Esta proposición se corroboró con los análisis de autocorrelación y correlación cruzada.

- La financiación de proyectos de investigación induce comportamientos y cambios de actitud en investigadores e instituciones de investigación fortaleciendo la construcción de capacidades científicas y tecnológicas. Esta proposición se validó principalmente con la aplicación de las técnicas para identificar cambios estructurales.
- La financiación en cada instante de tiempo podría estar influenciada por los resultados obtenidos en los proyectos de investigación. Esta proposición se evidenció con la aplicación del modelo VAR diseñado.

## 7.2 Resultados del análisis basado en series de tiempo

### 7.2.1 Descripción de las series de tiempo

Toda la información se rotuló con la fecha de aparición (o graduación, en el caso de los estudiantes doctorales) y los datos se acumularon por trimestres. La variable temporal en las series de tiempo se escribe en la forma *aaaa.qt* donde *aaaa* representa el año y *t* denota el trimestre correspondiente. Por ejemplo, 2014.q3 es el tercer trimestre de 2014. Se analizaron datos de número de publicaciones durante el período 1992q1 to 2015q4. Nótese que antes de 1992 no hubo convocatorias formales para financiar proyectos sino que éstos eran financiados esporádicamente y en forma *ad hoc*.

Una representación suavizada (mediante un proceso de promedio móvil) de las series de tiempo se presenta en la figura 7.7.

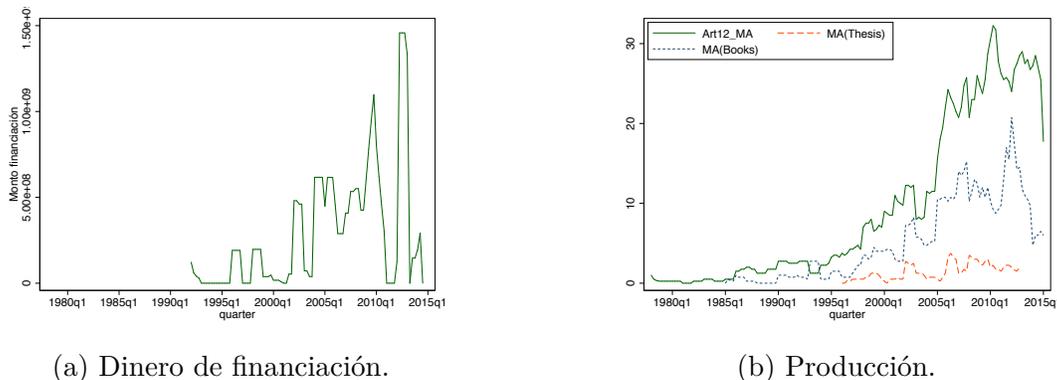
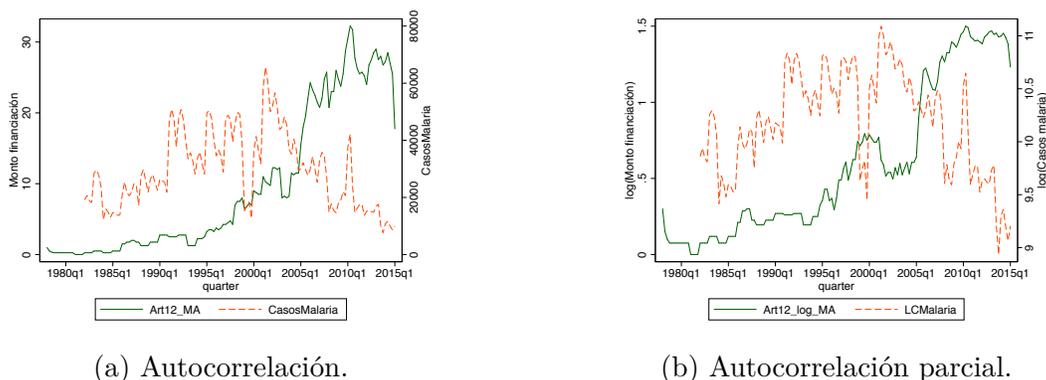


Figura 7.7: Series de tiempo de la investigación en malaria en Colombia.

La banda gris en las figuras señala un intervalo de confianza de 95 %. Los valores de autocorrelaciones que se encuentran dentro de la banda gris pueden suponerse que no difieren significativamente de cero y, por lo tanto, pueden despreciarse.

A partir de la función de autocorrelación (AC), se puede decir que existe una fuerte correlación entre el número de artículos publicados en un determinado momento con los



(a) Autocorrelación.

(b) Autocorrelación parcial.

Figura 7.8: Descripción de las series de tiempo de artículos publicados en el área de malaria.

publicados un año (cuatro trimestres) antes. La autocorrelación es siempre más fuerte para múltiplos de cuatro trimestres, como era de esperarse dados los ciclos anuales de las instituciones de investigación y las universidades. Existen autocorrelaciones significativas entre valores separados hasta cinco años. La función de autocorrelación parcial (ACP) es igual a la correlación de los valores a un momento con los valores de la misma en instantes anteriores, pero descontando los efectos de una relación lineal entre los valores intermedios. La ACP de la serie de artículos publicados se presenta en la figura 7.8(b). Como se puede observar, los valores actuales de la variable tienen una fuerte correlación con, por lo menos, los valores de la misma variable durante los últimos dos años (ocho trimestres).

También calculamos una función de Correlación Cruzada entre el número de artículos  $y_t$  y la cantidad de dinero invertida para financiar proyectos de investigación en malaria,  $g_t$ . El propósito es ilustrar la relación entre  $g_t$  y el resultado  $y_{t+k}$ , es decir, el resultado observado un tiempo  $k$  más tarde. Se ve que la inversión en investigación tiene una fuerte correlación con las publicaciones durante un intervalo largo; su efecto solamente empieza a desvanecerse después de aproximadamente cinco años.

Los valores de Correlaciones Cruzadas, para valores negativos de  $k$ , también indican que los resultados de las investigaciones podrían tener un efecto positivo sobre la cantidad de dinero invertido en el futuro. Este efecto de *retroalimentación* — *feedback*, ha sido observado en muchos casos de inversiones en investigación en varios campos.

Con el fin de analizar los efectos de las inversiones realizadas por Colciencias en el área de malaria, consideramos las series de tiempo de las publicaciones, tanto artículos como libros y la formación de nuevos investigadores en los grupos de investigación asociados con malaria en Colombia. Estas series fueron preprocesadas para asegurar la estacionaridad: En primer lugar, se hizo una transformación logarítmica (base 10)<sup>3</sup> para tener en cuenta las variaciones muy grandes de los números y asegurar una distribución de probabilidad

<sup>3</sup>En realidad para cada variable  $x_t$  se definió la transformación como  $\log_{10}(1 + x_t)$ , con el fin de evitar problemas numéricos debidos a la existencia de valores iguales a cero en productos o en inversiones para un trimestre dado. Con esta transformación se asegura que todos los valores será positivos.

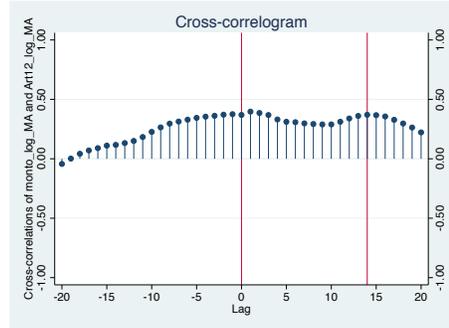


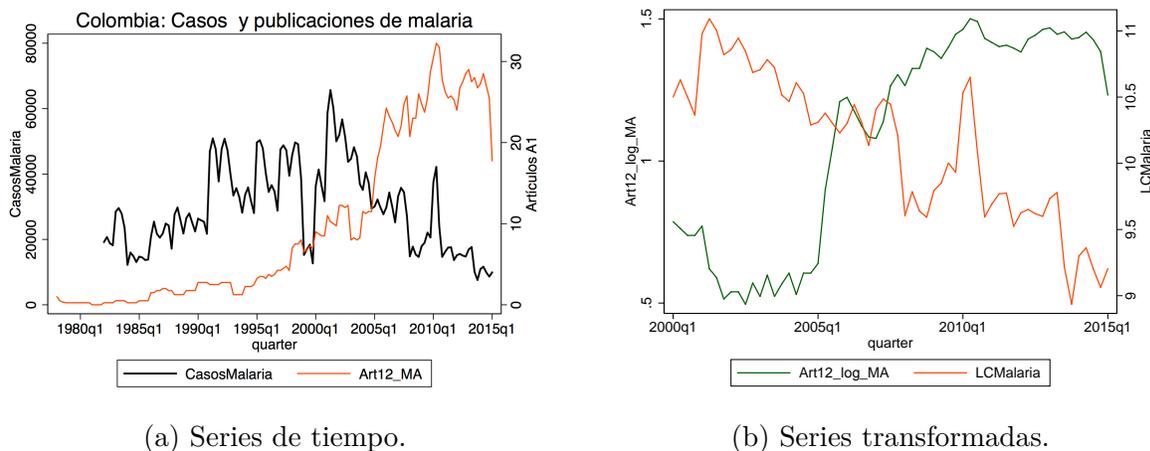
Figura 7.9: Correlación Cruzada de dinero invertido en financiación y número de artículos.

aproximadamente normal. A continuación, se eliminaron tendencias mediante diferenciación, para lograr estacionaridad. Por lo tanto, para cada serie original,  $\hat{x}_t$ , se definió una nueva variable así:

$$x_t = \log(1 + \hat{x}_t) - \log(1 + \hat{x}_{t-1}) = \log\left(\frac{1 + \hat{x}_t}{1 + \hat{x}_{t-1}}\right), \quad (7.1)$$

y estas diferencias fueron usadas en todo el análisis, excepto cuando se evaluó el uso de los modelos de Corrección de Error Vectoriales (VEC).

Por último, queremos ver la relación que puede existir entre los resultados de la investigación y los casos de malaria, notificados en Colombia. Una representación de las series de tiempo se presenta en la figura 7.10. En la parte (a) están las series de tiempo y en la figura (b) se presentan las series transformadas logarítmicamente y, en el caso de las publicaciones se hizo un proceso de promedio móvil para suavizar las fluctuaciones.



(a) Series de tiempo.

(b) Series transformadas.

Figura 7.10: Series de tiempo de publicaciones en el área de malaria y casos reportados.

Adicionalmente, y con base en la figura de la parte (b), se calculó la correlación entre las variables transformadas, puesto que la figura (b) sugiere una fuerte correlación entre

estas dos variables. Efectivamente, el coeficiente de correlación es de  $-0.788$ , un valor negativo bastante alto que refleja la variación inversa de las dos series. Podría ser que esta correlación fuera debida a factores externos que afectan de manera global el área, como, por ejemplo, el aumento de los recursos para la salud en general o para la malaria, que coincidieran con el crecimiento de la financiación por parte de Colciencias. Sin embargo, también es posible que el interés creciente en los temas de la malaria, reflejado en el número de publicaciones, haya incidido en una mayor atención a la epidemia. Así, aunque no pueda decirse por ahora que hay causalidad alguna, si se ve claramente que hay una variación común. Esto, tal vez, es más evidente cuando se observa la reducción marcada en el número de publicaciones a partir de 2014 y se coteja con el aumento reciente de los casos reportados de malaria.

### 7.2.2 Análisis de intervención

La observación de las series de tiempo de la producción científica del área de malaria y del área de medicina, muestra que hubo una reducción de la tasa de crecimiento durante el período reciente. El único cambio importante de política de financiación de la investigación que ha ocurrido en el país en las mismas fechas ha sido la creación del Sistema General de Regalías (SGR), el cual cambió de forma sustancial el mecanismo de asignación de recursos para la ciencia y la tecnología: Una cantidad muy importante de recursos de las regalías petroleras se debería invertir en proyectos de ciencia y tecnología. Colciencias es la agencia coordinadora del sistema, sin embargo, argumentando el aumento de recursos disponibles, el presupuesto de Colciencias se vio reducido. Se esperaba que los proyectos financiados a través del SGR, de alguna manera, se enfocaran en las áreas de investigación de importancia para el país.

Sin embargo, el procedimiento para asignar los recursos se dejó en manos de un comité dirigido por políticos y con escasa participación de los investigadores. Aunque todos los proyectos pasan por un proceso de revisión por pares expertos en la materia, el poder para seleccionar los proyectos quedó, básicamente, en manos de políticos. En consecuencia, se presentó una reducción de los recursos destinados a la Investigación, lo cual condujo a una reducción de la producción de los investigadores colombianos en varios campos.

Vamos a hacer un análisis de intervención para tratar de cuantificar el efecto que la adopción de dicha política ha tenido sobre el número de publicaciones de autores colombianos en el área de malaria. Usaremos el número de artículos publicados como un indicador de la productividad de los investigadores. Este indicador es muy relevante, especialmente a nivel agregado incluyendo todos los investigadores del país.

Se hizo un análisis de intervención para estimar el efecto de la adopción del SGR. Para ello se definió una variable *dummy* de la forma siguiente:

$$z_t = \begin{cases} 0 & t < T \\ 1 & t \geq 2012q1 \end{cases}, \quad (7.2)$$

puesto que la nueva política entró en vigencia a partir de 2012.

Para realizar el análisis de intervención obtuvimos un modelo ARMAX como sigue:

$$y_t = -0.0282z_{t-2} - 0.825y_{t-1} - 0.7847y_{t-2} - 0.7619y_{t-3} + 0.1385y_{t-4} + 0.20347\varepsilon_{t-2}. \quad (7.3)$$

En el cual se forzó una constante igual a cero teniendo en cuenta que las series habían sido diferenciadas.

Con base en este modelo, se puede estimar el efecto de la introducción de la nueva política, usando la ecuación 5.6:

$$\bar{y} = \frac{-0.0281637}{1 + 0.8250 + 0.7847 + 0.7619 - 0.1385} = -0.00871$$

Para interpretar el resultado en términos de las variables originales, usamos este resultado junto con la ecuación 7.1. Así, en el largo plazo,

$$\frac{1 + \hat{y}_t}{1 + \hat{y}_{t-1}} = 10^{-0.00871} = 0.9801.$$

o

$$\hat{y}_t = 0.9801 \hat{y}_{t-1} - 0.0199;$$

es decir, que una disminución de aproximadamente 2 % de un trimestre al siguiente podría ser atribuida al cambio de política.

En consecuencia, aunque el SGR puede haber llevado a mejoras en algunas áreas, su efecto sobre la investigación en malaria parece haber sido pronunciado y negativo.

### 7.2.3 Evaluación de los efectos de financiación de investigaciones

Una consecuencia fundamental de este trabajo es la posibilidad de estimar los efectos de una política real pasada o de una nueva política propuesta. Esto se puede lograr *ex ante* una vez que un modelo ha sido obtenido.

Con el fin de ilustrar el procedimiento, estudiamos el efecto que ha tenido la financiación de proyectos por parte de Colciencias sobre el número de artículos publicados en el área de malaria por autores vinculados a instituciones colombianas.

Sea  $y_t$  como se definió en la sección 7.2.2 y sea  $g_t$  la transformación de la cantidad de dinero de financiación, transformada según el modelo de la ecuación 7.3. Entonces, un modelo Auto-Regresivo con retardo distribuido (ADL) en la variable exógena  $g_t$ , se puede obtener a partir de las dos series:

$$y_t = 0.03051 g_{t-2} - 0.02180 g_{t-3} + 0.01738 g_{t-4} - 0.64693 y_{t-2} - 1.09221 \varepsilon_{t-1} + 0.52941 \varepsilon_{t-2}. \quad (7.4)$$

Este modelo indica que la producción científica en el área de malaria, en un instante dado, está determinada por la producción que se tuvo dos períodos (seis meses) antes y del monto de la inversión realizada en el último año. También se observa que las inversiones no empiezan a afectar la producción antes de un semestre.

Una vez establecida esta relación dinámica entre inversión y producción, es posible utilizarla para hacer predicciones acerca de los efectos futuros de distintas políticas de financiación. Esta capacidad es la que permite hacer estimaciones *ex ante* del impacto que pueda tener un programa de financiación de investigaciones. Este modelo podría utilizarse para evaluar una política prospectiva, o para determinar cuál podría ser la forma más eficiente de usar unos recursos disponibles.

Utilizando el modelo dado por la ecuación 7.4, simulamos cuatro escenarios futuros de inversión pública para financiar proyectos de investigación. Comparamos el efecto que podría tener, sobre la producción de artículos en el área de malaria, una política donde se incrementa en cada período el monto de los recursos destinados a financiar proyectos en el área. Se tomó como base la inversión promedio de los dos últimos años y se simularon escenarios donde este monto se incrementa cada período en 2 % y 5 %. Bajo estas condiciones se simuló la producción de artículos durante un período de 10 años (más de lo normal en este tipo de análisis, pero que permite una mejor visualización). Para efectos de comparación, también se simularon escenarios en los cuales el monto invertido se redujo en porcentajes de 2 % y de 5 %, con respecto al caso base. Por último, se simuló también el caso base, suponiendo que la política de inversión es mantener invariable el monto en un valor igual al promedio de los dos últimos años. Todas las simulaciones se hicieron tomando como condiciones iniciales los valores históricos de inversión y de producción.

En realidad, para tener en cuenta los efectos estocásticos, se realizó un número relativamente alto de simulaciones independientes y se promediaron sus resultados. De esta manera, disponemos tanto de un valor promedio que, esperamos, aproxime el valor esperado de los resultados obtenidos bajo cada escenario, como de intervalos de confianza adecuados. Para cada uno de los escenarios se simularon 10,000 replicaciones del proceso.

La figura 7.11 muestra los resultados de los pronósticos obtenidos para los cuatro escenarios descritos anteriormente. Por facilidad se han separado los escenarios en dos figuras: en la figura 7.11(a) se muestran los promedios de la producción del caso base y de los escenarios donde la inversión aumenta (o disminuye) un 2 % cada período. La figura 7.11(b) presenta los resultados correspondientes para aumentos o reducciones del 5 %.

#### 7.2.4 Modelo Auto Regresivo Vectorial (VAR)

La función de correlación cruzada entre la serie de tiempo de la cantidad de dinero invertida en cada período para financiar proyectos de investigación y la serie de la producción de artículos científicos por parte de los investigadores de alguno de los 106 grupos estudiados muestra una fuerte correlación para valores negativos del retardo (ver figura 7.9). Esta característica sugiere que podría tener lugar un fenómeno de retroalimentación (*feedback*). Esto significa, en este caso, que la cantidad de dinero asignado en cada instante de tiempo podría estar influenciada por los resultados de los proyectos de investigación, como se mencionó en la sección 7.2.1. Esta observación sugiere que podríamos diseñar un modelo en el cual las dos variables tengan un estatus similar.

Comparando varios modelos, se pudo seleccionar un modelo Auto-Regresivo Vectorial (VAR) que representa adecuadamente la interacción dinámica entre las dos variables, que

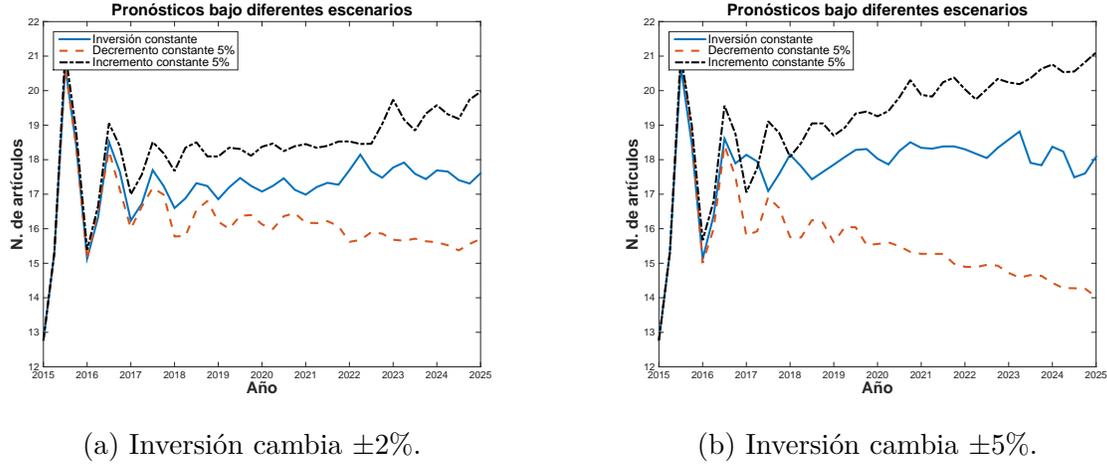
(a) Inversión cambia  $\pm 2\%$ .(b) Inversión cambia  $\pm 5\%$ .

Figura 7.11: Pronóstico de la producción bajo diferentes escenarios de inversión.

habían sido consideradas endógenas e independientes: el número de artículos  $p_t$  y el de libros  $b_t$  publicados por investigadores colombianos de malaria durante un determinado período  $t$ . A este par de variables se les agregó el valor de los recursos usados para financiar investigaciones, la cual denominamos  $g_t$ <sup>4</sup> y se obtuvo un modelo VAR como sigue:

$$\begin{bmatrix} p_t \\ b_t \\ g_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8980 & -0.1057 & 0.0028 \\ -0.1155 & -0.8570 & 0.0025 \\ -1.3711 & -1.4626 & -0.5224 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{t-1} \\ b_{t-1} \\ g_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.7207 & -0.2572 & 0.0081 \\ -0.1954 & -0.7014 & -0.0113 \\ -1.4927 & -1.3585 & -0.3220 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{t-2} \\ b_{t-2} \\ g_{t-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.7171 & -0.3123 & 0.0214 \\ -0.4370 & -0.4695 & -0.0062 \\ -2.9163 & -1.4220 & -0.1705 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{t-3} \\ b_{t-3} \\ g_{t-3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{p,t} \\ \varepsilon_{b,t} \\ \varepsilon_{g,t} \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Este modelo VAR permite el cálculo de la Función de Respuesta al Impulso — IRF. La IRF describe el efecto de una desviación unitaria (un aumento súbito de una desviación estándar) en una de las variables sobre los valores subsiguientes de cada una de las variables incluidas en el modelo (incluyendo la misma variable que se desvía inicialmente).

En la figura 7.12 se muestra la IRF para las dos variables  $p_t$  y  $g_t$ . Las dos figuras superiores muestran que cuando se presenta una desviación momentánea (se presenta un “shock”) en la variable de inversión,  $p_t$ , se presentan cambios moderados en la producción de artículos durante los períodos siguientes pero se inducen cambios importantes en los valores subsiguientes de la financiación. Las dos figuras inferiores, por otra parte, muestran que un cambio súbito pero transitorio en la financiación de proyectos tiene realmente muy poco efecto sobre el número de artículos publicados como resultado de las investigaciones financiadas. La situación podría ser muy diferente en presencia de una disponibilidad continuada de la financiación, pero la función de respuesta al impulso solo describe la respuesta ante una variación en un único período, regresando a cero de ahí en adelante.

Este resultado parece confirmar los indicios dados por la función de Correlación Cruzada. Aunque parece contraintuitiva, un modelo VEC de Corrección de error Vectorial

<sup>4</sup>En realidad, como se dijo antes, lo que usamos son las diferencias del  $\log_{10}$  de cada variable.

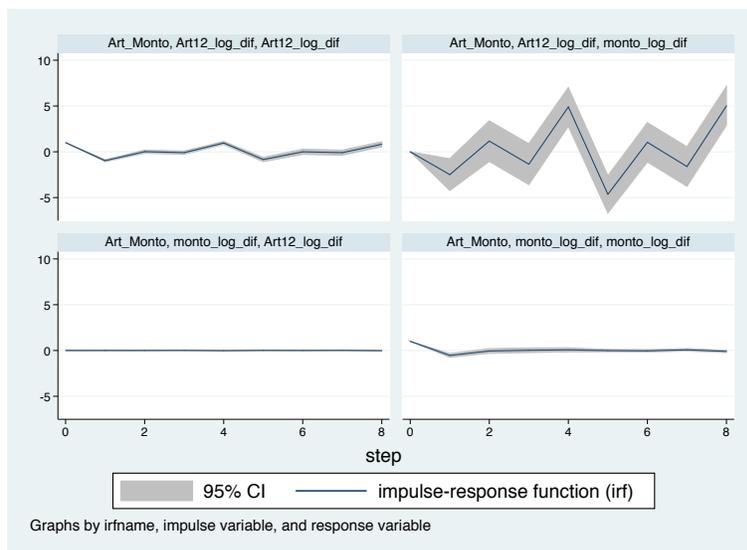


Figura 7.12: Función de Respuesta al Impulso de  $p_t$  y  $g_t$ , obtenida a partir del modelo 7.5.

que se desarrolló para las mismas series, dió resultados muy similares. Aunque las suposiciones de los dos modelos son muy diferentes porque el modelo VEC supone la existencia de alguna forma de equilibrio estocástico, los resultados son casi idénticos. Por otra parte hay que recalcar que la dinámica presentada en la figura 7.12 refleja el resultado de una intervención aislada que ocurre en un solo instante del tiempo. Esto hace más relevante el hecho de que esfuerzos momentáneos de financiación de la investigación producen muy pocos efectos de largo plazo sobre la productividad de los investigadores. Lo cual, naturalmente, es lo que los investigadores han venido sosteniendo durante mucho tiempo.

### 7.3 Resultados del modelo basado en agentes

En esta sección usaremos el modelo basado en agentes descrito en el capítulo 6 para evaluar el impacto de las políticas de financiación y de otras influencias externas e internas sobre la producción y la dinámica del sistema de investigación. Esta es la función básica del modelo para hacer evaluaciones *ex ante*: las ecuaciones que expresan las relaciones dinámicas entre las inversiones pasadas y presentes, así como la historia de las publicaciones recientes, permiten predecir los valores siguientes; esta predicción se usa recursivamente para predecir los valores futuros de la producción. De esta manera, dada una propuesta de financiación caracterizada por los montos a invertir durante los años siguientes, es posible predecir valores futuros de la producción.

Para efectuar los análisis se realizaron simulaciones con diferentes conjuntos de parámetros. Como se explicó en la sección 6.4.2, para cada conjunto de valores, se hicieron 100 replicaciones. Con este conjunto de resultados se evaluaron valores medios y se estimaron intervalos de confianza mediante *bootstrapping*, usando como muestra primaria los resul-

tados de las simulaciones y remuestreando con  $B = 1000$ . Los límites de los intervalos de confianza se calcularon usando el método *bootstrapping* básico y un nivel de confianza del 95 %.

### 7.3.1 Efectos de la política de financiación

A fin de estudiar cómo el modelo refleja los efectos de la política de financiación, se simularon varios casos en los cuales la fracción de proyectos financiados en cada convocatoria se varió entre 0.2 y 0.45 (variación entre 20 % y 45 %). Eso efectivamente representa una variación en la disponibilidad de los recursos para la financiación. De acuerdo con los datos históricos del área de malaria, los proyectos financiados han sido aproximadamente un 30 % del total de propuestas que se han presentado en las diferentes convocatorias.

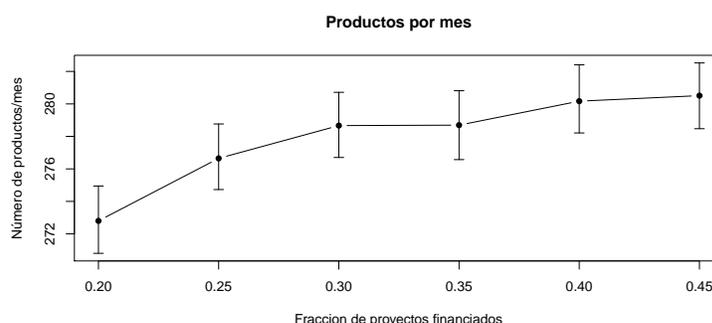


Figura 7.13: Producción mensual vs financiación nacional.

La figura 7.13 muestra los resultados de las estimaciones de la producción mensual del conjunto de los investigadores del área de malaria. Se puede observar que la producción crece en forma monótona con el porcentaje de proyectos financiados en las diferentes convocatorias. Aunque este resultado era de esperarse, es un resultado de la simulación del modelo y no hay ningún mecanismo directo incluido en el modelo que implique la relación.

También estudiamos la productividad global, definida como el número de productos de cada mes dividido por el número total de investigadores. Estos valores están en la figura 7.14. Así mismo se calculó una productividad promedio, evaluada como el promedio de las productividades de los diferentes grupos.

También queremos observar el efecto que un aumento en la financiación podría tener sobre el número total de publicaciones con respecto al número de investigadores que efectivamente son autores o coautores de cualquier producto. La razón para este interés es que existe una fracción del conjunto de investigadores que raramente participa en la producción. Estos suelen hacer trabajos de auxiliares durante las investigaciones y están registrados en el sistema como investigadores pero participan poco en la producción.

Las gráficas (figura 7.15) muestran que, efectivamente, cuando se consideran solamente los investigadores que han sido autores principales, la productividad global crece bastante

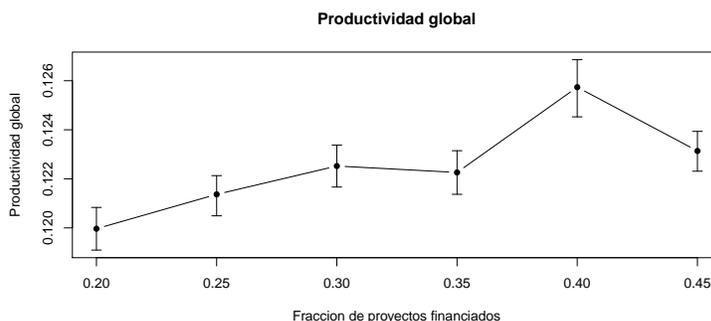


Figura 7.14: Productividad global vs financiación nacional.

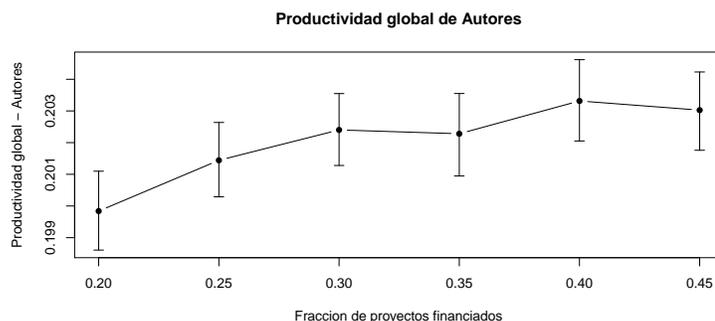
en comparación con la productividad calculada con respecto al total de investigadores. Si se considera el conjunto de investigadores que han sido autores o coautores, la fracción de productos disminuye, como es apenas obvio. Sin embargo las simulaciones muestran que un aumento sostenido en la financiación nacional, reflejado en el porcentaje de proyectos que reciben financiación en las convocatorias, conduce a crecimientos monotónicos en la producción.

### 7.3.2 Efectos de las coautorías

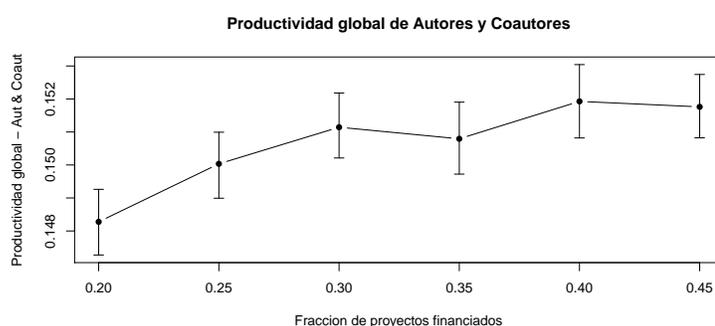
El número de coautores queda determinado por una distribución de probabilidad que se seleccionó ajustando los datos de los coautores colombianos que aparecen en la base de datos de Scopus. Según la información disponible se encontró que el número de coautores está dado, con una precisión razonable, por una distribución Gamma con promedio 5.6202 y con un factor de forma cercano a 2. Lo hemos supuesto exactamente igual a 2. Esto significa que se puede utilizar una distribución tipo Erlang(2, 1/5.6202).

Con el propósito de evaluar el efecto que el número de colaboradores podría tener sobre la producción global, se realizaron simulaciones donde se varió el número promedio de colaboradores invitados a ser coautores. Se dejaron todos los demás parámetros constantes con valores nominales, iguales a los del caso base. Se analizaron tres casos de variación del valor promedio de coautores usando los valores  $\{4.5, 5.5, 6.5\}$ . Como en los casos anteriores, se realizaron 100 replicaciones para conjunto de parámetros  $y$ , posteriormente se calcularon intervalos de confianza usando un procedimiento *bootstrap* con  $B = 5000$ . Los intervalos de confianza que se muestran son del 95 %.

En la figura 7.16, se observa que un aumento en el número promedio de coautores para los artículos ocurre simultáneamente con un aumento de la producción. Es clara la tendencia creciente, a pesar de que los intervalos no son disyuntos.



(a) Autor principal.



(b) Coautores.

Figura 7.15: Productividad global de autores y coautores vs financiación nacional.

### 7.3.3 Efectos de la colaboración entre grupos

La colaboración entre grupos se representa en el modelo por medio de la participación de integrantes de otros grupos en la elaboración de los productos que se inician por iniciativa de uno de los investigadores líderes. Existe un parámetro, denominado tasa de colaboración intergrupos (%-intergroup-collaboration en el modelo *Netlogo*), el cual representa la probabilidad de que cada uno de los investigadores nacionales, que un investigador líder invita a participar en la elaboración de un trabajo, pertenezca a un grupo diferente del suyo propio.

En nuestro estudio de caso, se consideraron variaciones de este parámetro en el conjunto  $\{0.1, 0.2, 0.3\}$ , manteniendo los demás parámetros en sus niveles nominales y se realizaron simulaciones para los diferentes valores de este parámetro. En la figura 7.17 se presenta el efecto de la variación de la tasa de colaboración entre 10 % y 30 %. Es claro que la colaboración entre grupos tiene un efecto positivo sobre el número de productos esperado total y también sobre la productividad del sistema, en términos de los productos mensuales por investigador.

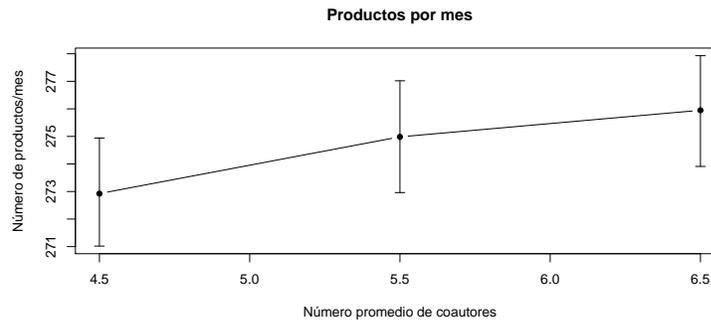


Figura 7.16: Producción mensual vs. número promedio de coautores.

### 7.3.4 Externalidades – Financiación internacional

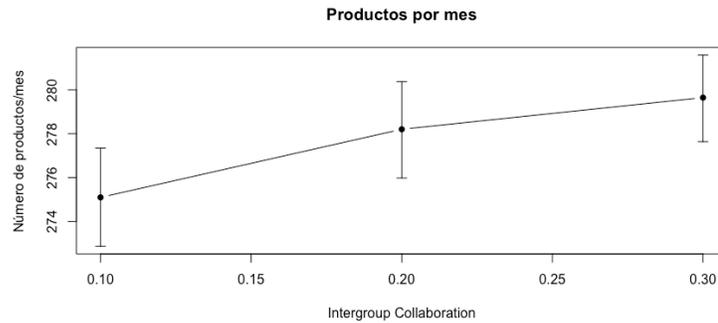
Como se describió en el capítulo anterior, la existencia de financiación internacional se considera como una externalidad, haciendo el supuesto de que su efecto debe ser similar a la financiación nacional. Por lo tanto, se utiliza el mismo modelo de regresión logística obtenido para la financiación nacional. Sin embargo, puesto que los montos y disponibilidades no son conocidos, su influencia será evaluada mediante análisis de sensibilidad. La forma de modelar la existencia de financiación internacional será suponiendo que dichos recursos estarán limitados a un porcentaje de los grupos de investigación más productivos y de mayor categoría a quienes consideramos como los más probables participantes en convocatorias internacionales. Por lo tanto, la intensidad de la disponibilidad de fuentes de financiación internacional se considerará mediante un análisis de sensibilidad con respecto al porcentaje de grupos de categoría A1 que pueden acceder a dicha financiación.

Se estudió, entonces el efecto de variaciones, entre 0 y 0.1, con incrementos de 0.02, en la fracción de grupos que pueden acceder a recursos internacionales.

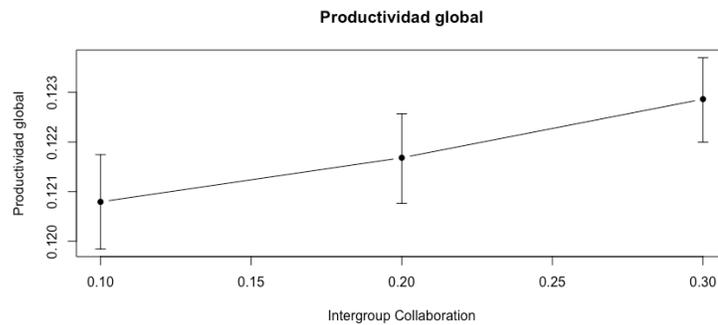
### 7.3.5 Variación simultánea de parámetros

Finalmente, se evaluó el efecto de cambiar simultáneamente varios de los parámetros que caracterizan el modelo. Se efectuaron variaciones de cinco parámetros como se muestra a continuación (entre paréntesis se muestran los valores usados en las simulaciones):

1. El porcentaje (fracción) de colaboración entre grupos ( $\{0.1, 0.3\}$ )
2. El porcentaje (fracción) de colaboración internacional, es decir, la probabilidad de que cada uno de los coautores de una publicación trabaje en el exterior ( $\{0.2, 0.3\}$ )
3. El número promedio de coautores para los productos ( $\{4.5, 5.5, 6.5\}$ )
4. El porcentaje (fracción) de grupos que en promedio presentan proyectos a las convocatorias de financiación ( $\{0.11, 0.25\}$ )



(a) Producción.



(b) Productividad.

Figura 7.17: Efecto de la tasa de colaboración entre grupos.

- El porcentaje (fracción) de proyectos que son financiados en promedio en cada convocatoria ( $\{0.2, 0.4\}$ )

Se simularon todas las posibles combinaciones (diseño factorial) de estos parámetros (un total de 48 conjuntos posibles) y con cada uno se hicieron 100 replicaciones, como se describió anteriormente. A partir de estos resultados se estimaron valores medios e intervalos de confianza, usando *bootstrapping*, para dos variables de resultado: la producción promedio por mes (medida en artículos por mes) y la productividad global (artículos por investigador por mes). Los resultados se resumen en la tabla 7.1.

A partir de los resultados de estas simulaciones, se efectuó un análisis de efectos principales para comparar la forma como cada uno de los parámetros afecta los resultados de la simulación. Un efecto principal se define como el efecto de un parámetro independiente sobre la variable de resultado, promediado sobre los resultados obtenidos para todos los posibles valores de los otros parámetros. De esta manera, se calcularon los efectos principales sobre las dos variables de resultado, los cuales se muestran en las figuras 7.21 y 7.22.

Se puede observar en las figuras de efectos principales que todos los parámetros tienen un efecto positivo sobre la productividad y sobre la producción del conjunto de investigadores, con la sola excepción del porcentaje de colaboración con coautores internacionales.

Experimento	Parámetros					Productos	Productiv
	Intergrupos	IntNal	Colaborac	%-Partic	%-Finan	Media	Media
1	0.1	0.2	4.5	0.11	0.2	272.9	0.12
2	0.1	0.2	4.5	0.11	0.4	280.3	0.123
3	0.1	0.2	4.5	0.25	0.2	279.5	0.123
4	0.1	0.2	4.5	0.25	0.4	288.2	0.127
5	0.1	0.2	5.5	0.11	0.2	275	0.121
6	0.1	0.2	5.5	0.11	0.4	279.4	0.123
7	0.1	0.2	5.5	0.25	0.2	279.6	0.122
8	0.1	0.2	5.5	0.25	0.4	293.8	0.129
9	0.1	0.2	6.5	0.11	0.2	275.9	0.121
10	0.1	0.2	6.5	0.11	0.4	283.7	0.124
11	0.1	0.2	6.5	0.25	0.2	283.8	0.124
12	0.1	0.2	6.5	0.25	0.4	292.6	0.128
13	0.1	0.3	4.5	0.11	0.2	271.2	0.119
14	0.1	0.3	4.5	0.11	0.4	280.1	0.123
15	0.1	0.3	4.5	0.25	0.2	276.8	0.121
16	0.1	0.3	4.5	0.25	0.4	287.5	0.126
17	0.1	0.3	5.5	0.11	0.2	274.4	0.12
18	0.1	0.3	5.5	0.11	0.4	278.4	0.122
19	0.1	0.3	5.5	0.25	0.2	277.2	0.121
20	0.1	0.3	5.5	0.25	0.4	288.0	0.127
21	0.1	0.3	6.5	0.11	0.2	276.8	0.121
22	0.1	0.3	6.5	0.11	0.4	280.3	0.123
23	0.1	0.3	6.5	0.25	0.2	281.2	0.123
24	0.1	0.3	6.5	0.25	0.4	291.5	0.128
25	0.3	0.2	4.5	0.11	0.2	275.4	0.121
26	0.3	0.2	4.5	0.11	0.4	282.1	0.124
27	0.3	0.2	4.5	0.25	0.2	285.2	0.125
28	0.3	0.2	4.5	0.25	0.4	294.6	0.129
29	0.3	0.2	5.5	0.11	0.2	281.3	0.124
30	0.3	0.2	5.5	0.11	0.4	281.3	0.123
31	0.3	0.2	5.5	0.25	0.2	283.4	0.124
32	0.3	0.2	5.5	0.25	0.4	296.9	0.131
33	0.3	0.2	6.5	0.11	0.2	284.3	0.125
34	0.3	0.2	6.5	0.11	0.4	286.9	0.126
35	0.3	0.2	6.5	0.25	0.2	290.7	0.127
36	0.3	0.2	6.5	0.25	0.4	300.6	0.132
37	0.3	0.3	4.5	0.11	0.2	276.5	0.121
38	0.3	0.3	4.5	0.11	0.4	278.4	0.122
39	0.3	0.3	4.5	0.25	0.2	279.3	0.122
40	0.3	0.3	4.5	0.25	0.4	290.5	0.128
41	0.3	0.3	5.5	0.11	0.2	274.9	0.121
42	0.3	0.3	5.5	0.11	0.4	284.4	0.125
43	0.3	0.3	5.5	0.25	0.2	283.5	0.124
44	0.3	0.3	5.5	0.25	0.4	294.3	0.129
45	0.3	0.3	6.5	0.11	0.2	282.9	0.124
46	0.3	0.3	6.5	0.11	0.4	285.4	0.125
47	0.3	0.3	6.5	0.25	0.2	287.3	0.126
48	0.3	0.3	6.5	0.25	0.4	297.5	0.13

Tabla 7.1: Resultados de las simulaciones en un diseño factorial, variando cinco parámetros.

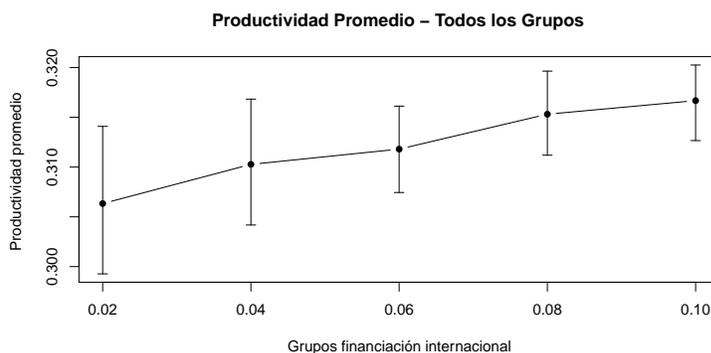


Figura 7.18: Productividad promedio de grupos cuando existe acceso a financiación internacional.

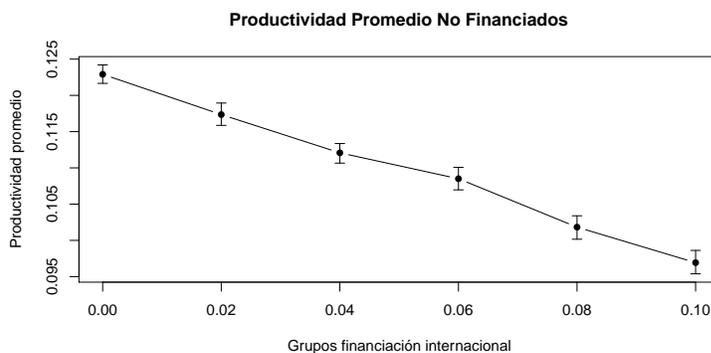


Figura 7.19: Productividad promedio de grupos con acceso a financiación internacional.

Un porcentaje mayor de coautores internacionales, implica que algunos productos no van a aparecer en el sistema nacional y por lo tanto habrá menos investigadores nacionales que aparezcan como coautores. Como resultado, la productividad tenderá a reducirse así como el número de productos registrados.

También se nota en las figuras que los dos parámetros que tienen el mayor efecto sobre las variables de resultado son las que corresponden a las convocatorias de financiación: el porcentaje promedio de grupos que se presentan a una convocatoria y el porcentaje promedio de proyectos que son financiados en dichas convocatorias. Esto, además, confirma la convicción de los investigadores de que es a través de la financiación como mejor se puede estimular la investigación en el país.

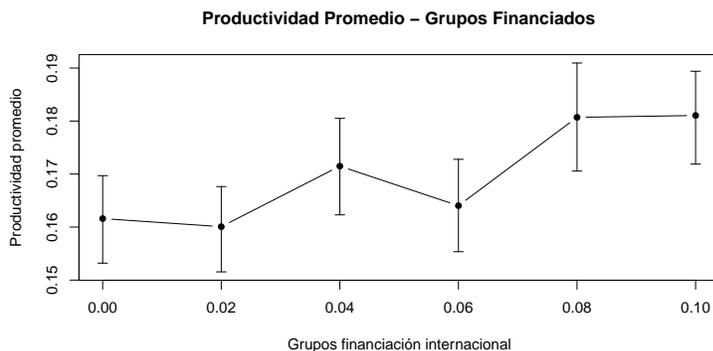


Figura 7.20: Productividad promedio de grupos sin acceso a financiación.

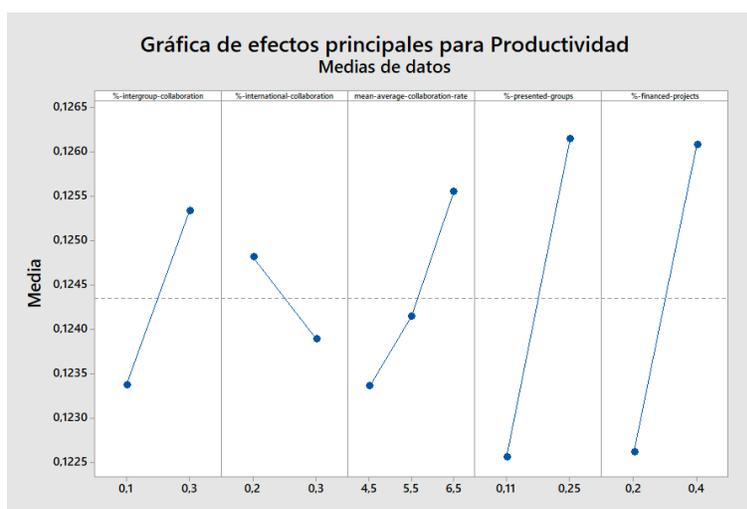


Figura 7.21: Efectos principales sobre la productividad global.

### 7.3.6 Análisis por superficie de respuesta

En este apartado vamos a utilizar la metodología de la **superficie de respuesta** (Khuri and Mukhopadhyay, 2010), para analizar los resultados obtenidos con el modelo basado en agentes. Estamos interesados en estudiar la influencia que diversos parámetros del modelo tienen sobre los resultados de las simulaciones.

En esta metodología, hacemos un diseño de experimentos, el cual ya fue descrito cuando presentamos el análisis de sensibilidad. Se trata de un diseño factorial, en el cual consideramos un conjunto de cinco parámetros a los cuales se les asignó un valor bajo y uno alto (con la excepción del número promedio de coautores al cual se le asignaron tres valores). Con cada combinación de valores de los parámetros se efectuaron 100 simulaciones para tener en cuenta los efectos probabilísticos y se tabularon los resultados. Este experimento fue la base del análisis de sensibilidad ya discutido.

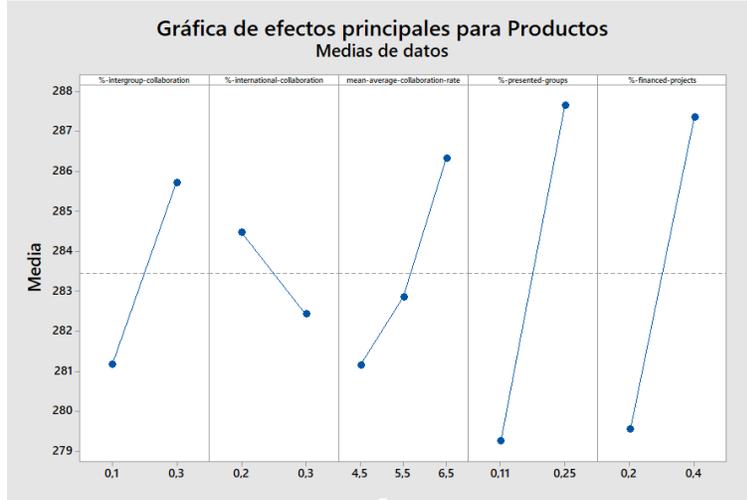


Figura 7.22: Efectos principales sobre la producción mensual.

En esta sección queremos analizar interacciones no lineales entre los efectos de varios parámetros. Estas interacciones no pueden ser apreciadas en los análisis de sensibilidad. En consecuencia, vamos a aproximar la respuesta del sistema, representada por una variable escalar  $P$ , como una función no lineal de los parámetros (una hipersuperficie).

Para todos los propósitos prácticos es suficiente con una aproximación cuadrática a la hipersuperficie que representa la respuesta del modelo ante cambios en los diferentes parámetros. Por lo tanto, vamos a aproximar el conjunto de resultados de las simulaciones por medio de una función de segundo grado en las cinco variables que representan los parámetros ajustables del modelo:

$$P = \alpha + \beta^T X + X^T \Gamma X \quad (7.6)$$

$$= \alpha + \sum_{i=1}^5 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^i \gamma_{ij} x_i x_j, \quad (7.7)$$

donde  $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$  y las variables han sido definidas como los valores de los siguientes parámetros en las simulaciones:

$x_1$  : %-intergroup-collaboration, fracción de coautores de otros grupos para un producto dado

$x_2$  : %-international-collaboration, fracción de coautores internacionales

$x_3$  : mean-average-collaboration-rate, el número promedio de coautores

$x_4$  : %-presented-groups, la fracción de grupos que presentan proyectos en una convocatoria

$x_5$  : %-financed-projects, la fracción de proyectos que se financian en una convocatoria.

Los coeficientes de la ecuación 7.7 se pueden obtener usando los resultados de 4800 simulaciones en las cuales se variaron cada uno de los parámetros con el fin de evaluar el efecto que tienen esos parámetros sobre la respuesta.

De la misma manera consideramos tres posibles funciones de respuesta:

$P$  : El número de productos mensual promedio de los últimos doce meses.

$P_{global}$  : La productividad global, definida como el promedio, durante los últimos doce meses, del número total de artículos de un período, dividido por el número total de investigadores

$P_{prom}$  : El promedio, durante los últimos doce meses, de la productividad de los diferentes grupos.

Usando un estimador de mínimos cuadrados, es posible obtener los coeficientes del modelo de superficie de respuesta. Por ejemplo, para la producción  $P$ , el modelo resultante es:

$$\begin{aligned} P = & 286.57 - 15.59 x_1 - 3.90 x_2 - 8.51 x_3 + 4.47 x_4 + 21.61 x_5 - 26.39 x_1 x_2 \\ & + 7.6240 x_1 x_3 + 55.69 x_1 x_4 - 23.25 x_1 x_5 + 1.47 x_2 x_3 - 113.88 x_2 x_4 \\ & + 3.72 x_2 x_5 + 0.88 x_3^2 + 1.99 x_3 x_4 - 2.90 x_3 x_5 + 206.09 x_4 x_5. \end{aligned} \quad (7.8)$$

Vamos a presentar la superficie de respuesta ante variaciones en pares de parámetros con el fin de comprender un poco mejor la variación de la respuesta del modelo con respecto a sus parámetros. Por ejemplo, la figura 7.23 muestra en la parte (a) la forma como varía la producción mensual promedio, a través de sus curvas de nivel, cuando  $x_1$  y  $x_2$  varían. En la figura (b) se presentan curvas de nivel de producción ante variaciones en  $x_3$  y  $x_4$ .

Las curvas de nivel confirman lo que el análisis de sensibilidad había revelado: que un aumento del porcentaje de proyectos que son efectivamente financiados —lo que equivale a incrementar la financiación— tiene un efecto importante sobre la producción. Un efecto similar tiene el número promedio de coautores. De hecho, la figura 7.23(b) muestra que cuando el nivel de financiación de los proyectos es bajo, un cambio de la financiación tiene un efecto mucho menor sobre la producción que un cambio en el número promedio de coautores. Se observa en dicha gráfica también claramente la relación no lineal existente entre la producción y esos dos parámetros. De acuerdo con las curvas de nivel, se puede concluir que para valores bajos de número de coautores y financiación, la política óptima<sup>5</sup> puede ser incrementar el número de coautores. En cambio cuando los valores son cercanos a los que caracterizan el centro de la gráfica, la política óptima podría ser una combinación de aumento en los dos parámetros en forma simultánea.

<sup>5</sup>Moviéndose en la dirección del gradiente (perpendicular a las curvas de nivel), para maximizar la producción.

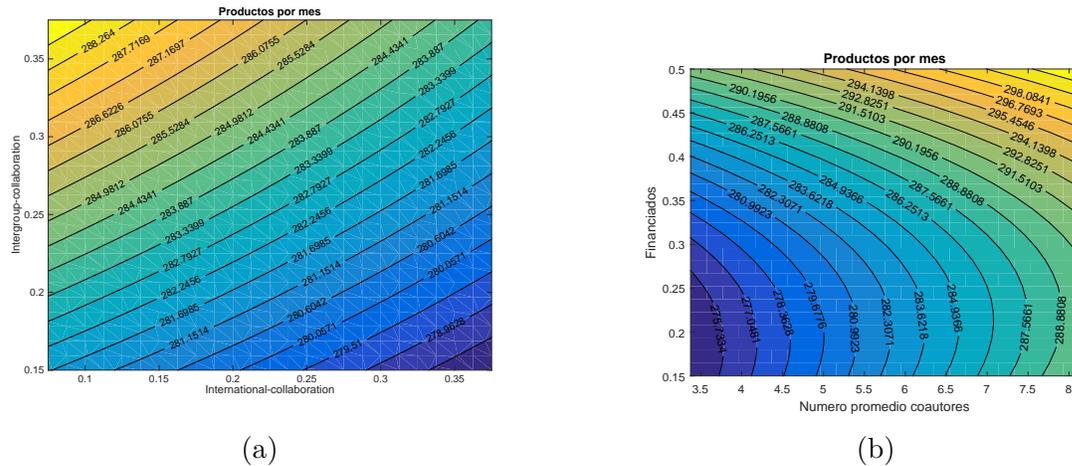


Figura 7.23: Curvas de nivel de la superficie de respuesta de la producción total del conjunto de investigadores. (a): en función de las tasas de participación de autores de otros grupos e internacionales (b): en función del número promedio de coautores de un producto y la fracción de proyectos financiados.

La figura 7.23(a), por contraste, muestra que la producción se ve afectada en forma aproximadamente igual por la tasa de colaboración inter-grupos o por la tasa de colaboración internacional. La política óptima, en consecuencia, prácticamente no depende del estado actual de los parámetros.

La productividad promedio se ve mucho más afectada por la colaboración entre grupos que por la colaboración internacional, según lo muestra la figura 7.24(a). Este comportamiento, en realidad es fácil de entender puesto que la productividad promedio cuantifica qué tan productivos son los grupos de investigación en vez de todo el sistema en su conjunto. Por lo tanto, cuando las coautorías con autores extranjeros crecen, disminuye el número de coautores de grupos diferentes. Como resultado, menos grupos nacionales participan en la producción. Aunque el número de productos totales aumenten, su influencia solo va a sentirse en un número menor de grupos nacionales. La productividad promedio no se va a ver muy afectada si un solo grupo aumenta su producción. La productividad global, por el contrario, tiene un comportamiento muy similar al número total de productos. Esto por supuesto refleja el efecto acumulativo de los productos de cada grupo, independientemente de si los otros grupos participan o no en la producción.

## 7.4 Entrevistas a integrantes de la comunidad científica

Con el objetivo de contrastar las conclusiones derivadas de los modelos con la percepción que tienen los investigadores, se realizaron entrevistas a cuatro líderes de grupos de investigación con intereses en el área de malaria. Por lo tanto estas entrevistas no

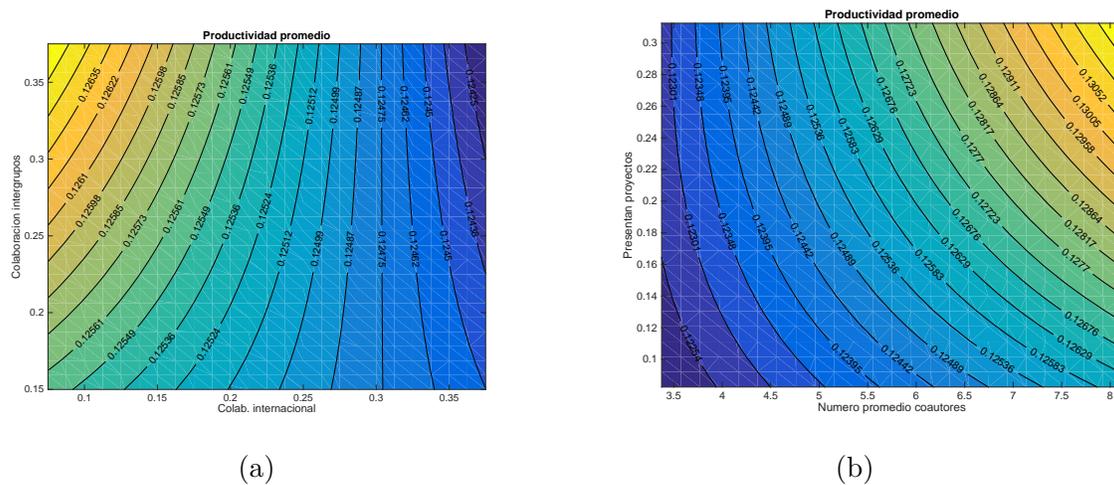


Figura 7.24: Curvas de nivel de la superficie de respuesta de la productividad promedio de los grupos. (a): en función del número promedio de coautores de un producto y la fracción de proyectos financiados. (b): en función de las tasas de participación de autores de otros grupos e internacionales.

pretenden levantar información de insumo a los modelos sino generar un valor agregado cualitativo de verificación de los resultados. Las entrevistas se realizaron de acuerdo con la guía de entrevista presentada en el Anexo No. 1.

Los expertos entrevistados fueron los siguientes:

- El médico, científico e investigador Sócrates Herrera Valencia, director del Centro de Investigaciones Científicas Caucesco.
- El Ingeniero Químico Jorge Alonso Cano Restrepo, director del Centro Internacional de Entrenamiento e Investigaciones Médicas - CIDEIM
- El inmunólogo Manuel Elkin Patarroyo, director del Instituto Inmunológico de Colombia.
- El Ingeniero Electricista Hernando Díaz Morales, director del grupo de investigación Modelamiento y Control de Sistemas Biológicos.

Las conclusiones de las entrevistas realizadas se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Los grupos de investigación en malaria de amplio reconocimiento y de gran tamaño reciben mas financiación internacional que nacional.
2. Estos grupos generalmente colaboran con grupos de investigación que tienen la misma dinámica creando redes de colaboración importantes.

3. El grupo de tipo interdisciplinario, Modelamiento y control de sistemas biológicos, ha encontrado más fácil establecer lazos de cooperación con grupos internacionales que con los nacionales.
4. Los resultados de los proyectos de investigación que desarrollan les permiten preparar artículos científicos con coautorías internacionales, que se publican en el curso de los dos o tres años y tienen una tasa de aceptación entre el 80 y 100 % al primer intento.
5. Las publicaciones científicas de estos grupos también sirven para gestionar la financiación futura para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación.
6. Consideran que el panorama de la investigación en Colombia es pesimista dado que cada vez son mayores los recortes en el presupuesto de Colciencias y el trámite de recursos por el Sistema General de Regalías es complicado y está a merced de los gobernadores.
7. Consideran que, en materia de ciencia y tecnología y en el área de salud, el gobierno ha tomado malas decisiones y ha cometido errores inaceptables, desde el punto de vista administrativo, como por ejemplo que el país no haya contado con los medicamentos requeridos en el momento oportuno conociendo que iban a darse incrementos en los casos de malaria.
8. Los procedimientos administrativos en el país frecuentemente obstaculizan la gestión de recursos para la investigación y para el sector de salud, en general.



# Capítulo 8

## Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se concluye la discusión en torno a los modelos de evaluación de impacto *ex ante* diseñados y a su aplicación en el estudio de caso. Se exponen las conclusiones, señalando los aspectos más relevantes de la investigación y se proponen algunas recomendaciones que indican acciones sugeridas para el desarrollo de futuras investigaciones sobre la temática de evaluación de impacto.

### 8.1 Conclusiones

- La tendencia mundial de formular políticas basadas en la evidencia ha conducido a un mayor interés en la evaluación de impacto, tanto cualitativa como cuantitativamente. Herramientas como las que se presentan en esta tesis permiten analizar la calidad y efectividad de las intervenciones estatales en programas de investigación.
- En el desarrollo de esta investigación se diseñaron dos modelos diferentes para hacer la evaluación de impacto *ex ante* de proyectos de investigación: un modelo basado en análisis de series de tiempo y otro, basado en agentes. Estos modelos pueden ser complementarios, puesto que permiten analizar los efectos de diferentes factores sobre los resultados de las investigaciones.

El modelo que utiliza análisis de series de tiempo, requiere contar con la información histórica detallada de diferentes variables, tanto endógenas como exógenas, para poder construir los modelos requeridos. Es posible incluir diversos tipos de impactos, siempre y cuando su evolución histórica haya sido registrada. Las herramientas descritas en esta investigación, además de permitir un diagnóstico basado en estadísticas descriptivas, también posibilitan hacer análisis de intervención, identificar cambios estructurales y pronosticar los resultados, *ex ante*.

El modelo basado en agentes permite simular los procesos de creación de conocimiento y los comportamientos dinámicos de los investigadores y su relación con los grupos de investigación. Es posible simular comportamientos adaptativos, complejos, que generen aprendizajes que puedan resultar en comportamientos emergentes,

lo cual facilita la evaluación de políticas públicas en ciencia y tecnología y de la forma como los investigadores y los grupos responden a ellas, antes de su implementación.

- El análisis basado en series de tiempo muestra que el cambio en la financiación de los proyectos de investigación y desarrollo, a partir de la adopción del Sistema General de Regalías, ha tenido un efecto negativo notable, sobre la inversión nacional en ciencia y tecnología, y sobre la producción científica nacional.
- El modelo basado en agentes fue creado a partir de la información detallada de los investigadores y los grupos y de características observables de sus interacciones y de su producción. Con base en estas observaciones, se diseñaron mecanismos y reglas que modelan la forma como los investigadores interactúan unos con otros y con los grupos de investigación. También se representó el proceso de producción de conocimiento mediante un modelo probabilístico que cuantifica la probabilidad de que un investigador genere un producto en un mes determinado y predice el número probable de productos generados, cuando eso sucede. El modelo también describe el proceso de selección de coautores y colaboraciones con grupos nacionales e internacionales.
- Para el diseño del modelo basado en agentes fue necesario establecer modelos parciales de subprocesos dinámicos del sistema. Además del ya mencionado de generación de productos, se creó un modelo dinámico de aparición y desaparición de investigadores en el sistema y de su incorporación a los grupos de investigación.
- Como resultado de la aplicación del modelo basado en agentes al caso de malaria en Colombia, podemos concluir lo siguiente:
  - La financiación nacional tiene un efecto positivo sobre la producción y la productividad, lo cual se observó a diferentes niveles: de cada investigador, de grupos de investigación y de todo el sistema. Este efecto es estadísticamente significativo a un nivel de confianza de 99.9 % ( $\alpha = 0.001$ ).
  - La acción de crear un producto, por parte de un investigador puede ser modelada teniendo en consideración factores propios del investigador, como la cantidad de productos que ha publicado, su género y su nivel educativo; factores del grupo de investigación, como su tamaño y su categoría; factores económicos, como la posibilidad de acceder a recursos de financiación de la investigación a través de su grupo; y factores históricos, como la producción registrada en su grupo en el último año. Esta última, confirma que el proceso de producción es de carácter dinámico y que los cambios en el sistema pueden, no solo tener un efecto inmediato, sino también un efecto en el largo plazo, que no puede omitirse en una evaluación de impacto.
  - Si se financian los grupos con mayor productividad, en detrimento del resto de grupos, se aumenta la brecha existente entre los grupos financiados y los no financiados. Esto se refleja en que el indicador de productividad de estos

últimos resulta aún menor al compararse con el de los financiados, como el caso que hemos simulado de financiación internacional, a la cual solo tienen acceso los grupos más grandes. Este efecto también se observaría si se abren convocatorias dirigidas exclusivamente a los grupos de investigación categoría A1, lo cual realmente ha sucedido en más de una ocasión en las convocatorias de Colciencias.

- Un análisis basado en superficies de respuesta muestra curvas de nivel que confirman lo que el análisis de sensibilidad había revelado: que un aumento del porcentaje de proyectos que son efectivamente financiados —lo que equivale a incrementar la financiación— tiene un efecto muy significativo sobre la producción científica.
  - Las superficies de respuesta también muestran que cuando el nivel de financiación de los proyectos es bajo, un cambio de la financiación tiene un efecto mucho menor sobre la producción que un cambio en el número promedio de coautores, mientras que cuando la financiación es alta la situación cambia y los efectos de los dos factores son comparables. Igualmente se puede concluir que para valores de financiación bajos, la política óptima de desarrollo podría basarse en un incremento en la colaboración entre investigadores, resultante en mayor número de coautores por producto.
  - El modelo logit, construido para describir la probabilidad de generar productos en un mes determinado, ha sido validado realizando predicciones a nivel macro y en ventanas de tiempo anuales o más amplias. El modelo, por supuesto, no predice producciones a nivel individual, pues el acto de producir en un mes específico está sujeto a una gran aleatoriedad.
- Al evaluar el impacto de programas de investigación, la metodología de diferencias en diferencias no es la más indicada. Esto debido a que, en primer lugar, la selección de los grupos de investigación o investigadores a los grupos de tratamiento y de control (“Financiados” vs “No financiados”) no puede hacerse aleatoriamente. De hecho, los miembros de la clase “Financiados” usualmente tienen características diferentes a los “No financiados”. Por lo general, los “Financiados” pueden hacer mejores propuestas de investigación. Por lo tanto, la premisa básica de que las diferencias se deben fundamentalmente a la financiación no tiene sustento. En segundo lugar, la población de grupos de investigación incluye también los que decidieron no presentarse a la convocatoria. Adicionalmente, los que sí presentaron propuesta probablemente también experimentaron progresos, como resultado de su elaboración y de los conceptos críticos de los evaluadores. Es decir, que como resultado del programa de financiamiento, se produjo un avance en estos grupos también, el cual no debería restarse de los impactos sino sumarse. En tercer lugar, no es posible garantizar que los resultados promedios antes y después del programa sean independientes, según se ilustró en la figura 3.1.
  - La producción científica es un proceso acumulativo y de largo plazo. Por lo tanto, una

metodología de análisis basada en un enfoque de sistemas dinámicos, cuya respuesta sea no solo el resultado de las últimas acciones sino también de su historia reciente es el marco metodológico adecuado para su estudio. La no simultaneidad de las causas y los efectos requiere un punto de vista diferente al de los estudios tradicionales de impacto de políticas públicas. Por lo tanto, un enfoque donde se modela el proceso de la investigación como un proceso estocástico dinámico, afectado por estímulos exógenos aplicados a lo largo del tiempo, es un entorno natural con el cual evaluar los impactos de la financiación de la investigación. Es decir, que la herramienta natural para analizar estas dinámicas es la teoría de series de tiempo.

- El análisis de las influencias mutuas entre las producciones científicas de diferentes países, basado solamente en la producción, revela algunos aspectos interesantes de la influencia mutua entre sus respectivas comunidades científicas. Aun cuando los resultados confirman lo que muchos piensan, es importante poder cuantificar dichas relaciones. Un análisis más detallado podría ser posible si se dispusiera de series que cuantifiquen las co-autorías y citas en artículos escritos, por autores de un país, de los artículos escritos en otro.
- Se ilustró con varios ejemplos que los efectos de financiar proyectos de investigación se pueden estudiar ventajosamente por medio de modelos dinámicos que describen influencias y efectos variables en el tiempo. El desarrollo de un modelo que describa los efectos de aumentar o disminuir la cantidad de dinero disponible para financiar la investigación sobre la producción científica proporciona una herramienta para evaluar, *ex ante*, los efectos de una política pública de financiación de la investigación.
- Aun cuando muchos de los análisis se han enfocado en la producción científica, representada en publicaciones en revistas indexadas, las técnicas basadas en análisis de series de tiempo pueden ser aplicadas sin dificultad a cualquier otra medida o medidas de la efectividad de la investigación. Algunos autores han propuesto, por ejemplo, una suma ponderada de todos los tipos de productos resultantes de los proyectos: nuevos conocimientos, innovaciones, divulgación, formación de nuevos investigadores, etc. Estas variables podrían incluirse sin dificultad en nuestros modelos, siempre y cuando la serie de tiempo esté disponible.

## 8.2 Recomendaciones

- La evaluación *ex ante* de los efectos de la financiación de programas de investigación podría conducir a un mejor proceso de toma de decisiones, una asignación más eficiente de los recursos públicos y a un conjunto renovado de herramientas para la evaluación de responsabilidades (*accountability*).
- Metodologías como las que se proponen en esta investigación no pueden ser aplicadas si no hay datos disponibles sobre los diferentes aspectos a tener en cuenta

en el estudio. En Colombia, a diferencia de otros países y a pesar de la política de transparencia, no se ponen a disposición de la comunidad científica los datos de los diferentes sectores de la vida nacional. Esto impide la realización de muchos estudios que pudieran analizar, evaluar y pronosticar tendencias e impactos que sirvan como retroalimentación a la efectividad de las políticas públicas. Sería recomendable una política tipo *open data*, con la cual se proteja la disponibilidad y la utilización de la información existente.

- Tal como fueron diseñadas las metodologías de evaluación, se prestan para analizar los efectos agregados de las políticas de financiación de la investigación. Por lo tanto, sería recomendable realizar una evaluación de impacto *ex ante* en áreas macro, tales como salud o ciencias básicas o sociales o a nivel nacional para poder incorporar adecuadamente los procesos de generación de conocimiento a fin de influir adecuadamente sobre las políticas de financiación.
- Existen numerosas herramientas, adicionales a las que se han descrito en esta tesis, como métodos no lineales o técnicas basadas en *wavelets*, que podrían dar información de carácter estructural sobre las relaciones entre diferentes áreas o variables. Una siguiente fase de esta investigación podría incluir estas técnicas.



# Apéndice A

## Ecuaciones de diferencias

La evolución en el tiempo de las variables que caracterizan el proceso de la investigación es lo que denominamos su **dinámica**. En nuestro trabajo utilizamos modelos para la dinámica que tienen la forma de **ecuaciones de diferencias**. Una ecuación de diferencias para la variable  $y$  relaciona su valor en el tiempo  $t$ , el cual llamamos  $y_t$  con los valores de la misma variable en tiempos anteriores así como los de otras variables exógenas. Un ejemplo de una ecuación de diferencias es la siguiente:

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \cdots + \alpha_p y_{t-p} + \varepsilon_t,$$

donde  $y$  es una variable de interés,  $\varepsilon_t$  es un proceso de ruido blanco y  $\alpha_0, \alpha_1, \dots$  son constantes reales. Este modelo indica que los valores actuales de la variable,  $y_t$ , pueden ser determinados si sus últimos  $p$  valores son conocidos. Esta se llama una ecuación de orden  $p$ . El orden de la ecuación es el retardo de orden mayor de la variable que aparece en la ecuación. Una ecuación como la anterior puede ser transformada en un sistema equivalente de ecuaciones de primer orden involucrando  $p$  variables auxiliares (Luenberger, 1979). Por ejemplo, la ecuación de segundo orden,

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \varepsilon_t,$$

puede ser transformada, definiendo nuevas variables  $x_t = y_t$  and  $z_t = y_{t-1} = x_{t-1}$ . Entonces, resulta un sistema de ecuaciones,

$$\begin{aligned} x_t &= \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 z_{t-1} + \varepsilon_t \\ z_t &= x_{t-1}. \end{aligned} \tag{A.1}$$

Un sistema de ecuaciones como este también se denomina un sistema de segundo orden. La ecuación anterior se puede escribir usando matrices como

$$\begin{bmatrix} x_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ z_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_0 + \varepsilon_t \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{A.2}$$

La naturaleza de las soluciones de esta ecuación está determinada por los valores (o raíces) característicos o autovalores de la matriz

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

En el caso general de una ecuación de orden  $n$ , es posible transformarla en un conjunto de  $n$  ecuaciones de primer orden involucrando  $n$  variables auxiliares que llamamos **variables de estado**. Todas las soluciones de la ecuación de diferencias tienen la forma

$$y_t = \sum_{i=1}^n a_i(t) \lambda_i^t + \eta_t,$$

donde los  $\lambda_i$  son los valores característicos de la matriz, los coeficientes  $a_i(t)$  son constantes o polinomios en  $t$  y los términos  $\eta_t$  representan procesos de ruido blanco.

La última ecuación muestra que, si algún valor característico satisface  $|\lambda_i| > 1$ , entonces las soluciones crecen geoméricamente en el tiempo. Si todas las raíces características tienen valor absoluto<sup>1</sup>, menor que 1, la solución decrece o permanece acotada.<sup>2</sup> Cuando hay una raíz con módulo igual a 1, la solución será considerada inestable por razones que están fuera del alcance de esta exposición elemental. Una explicación simple se puede encontrar, por ejemplo, en (Luenberger, 1979).

Por lo tanto, es muy importante chequear que las raíces características de todas las ecuaciones utilizadas se encuentren dentro de un círculo de radio unitario en el plano complejo. Esa es la motivación para chequear lo que en el lenguaje de series de tiempo se denominan “raíces unitarias —**unit roots**”.

---

<sup>1</sup>O su módulo, cuando se trata de números complejos.

<sup>2</sup>Las soluciones que crecen sin límite se denominan **inestables**. En caso contrario son **estables**.

# Apéndice B

## Series de tiempo o series temporales

En nuestros análisis utilizamos modelos descritos por ecuaciones de diferencias estocásticas de la forma

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i \varepsilon_{t-i},$$

donde  $y_t$  es una variable real y  $\varepsilon_t$  es un proceso de ruido blanco.<sup>1</sup>

### B.1 Preparación de datos

La mayoría de las pruebas estadísticas disponibles para analizar series de tiempo están basadas en la condición de **estacionaridad**. Eso significa que la serie ha sido generada por una realización de un **proceso estocástico estacionario (en sentido amplio)**. Con frecuencia, es suficiente con asegurarse de que el valor esperado y la varianza sean constantes en el tiempo; se habla entonces, de un proceso **de varianza estacionaria**. Por lo tanto, es importante estar seguro de que las series que están siendo utilizadas satisfacen esas condiciones; en particular, se requiere eliminar cualquier tendencia en el tiempo. Por lo tanto, cuando se tiene una serie de tiempo no estacionaria, se debe realizar un proceso de descomposición para estudiar solamente las componentes que son estacionarias antes de intentar obtener cualquier modelo.

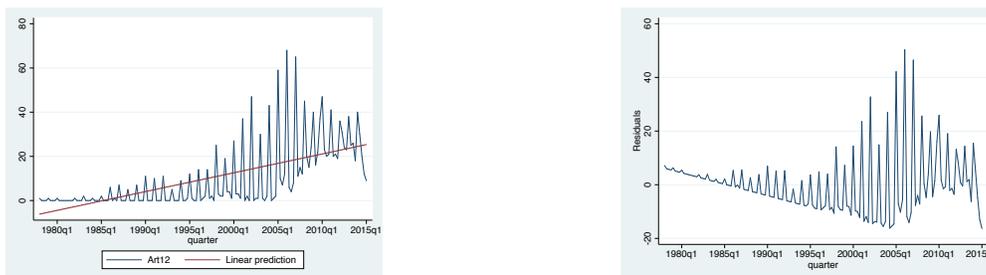
En esta sección discutiremos algunas de las transformaciones requeridas para garantizar que las series cuyo comportamiento trataremos de aproximar con nuestros modelos sean estacionarias. Describiremos en particular dos métodos usados para eliminar tendencias: Eliminación de una tendencia lineal y **diferenciación** es decir, cálculo de la diferencia entre el valor actual y valores anteriores de la variable.

---

<sup>1</sup>Una sucesión  $\{x_t\}$  se denomina un proceso de ruido blanco si, para todo  $t$ , los valores de  $x_t$  tienen valor esperado igual a cero y varianza constante y, si para  $x_t$  y  $x_s$  son no correlacionados para cualquier par de valores de tiempo  $t$  y  $s$ .

### B.1.1 Eliminación de tendencia

Cuando la serie en consideración tiene una tendencia lineal es necesario eliminarla. Una forma de asegurar que el valor esperado de la variable sea cero para todo  $t$ , consiste en restar el término que representa la tendencia determinística. La tendencia determinística se puede identificar mediante una regresión lineal con la variable que representa el tiempo. La idea se ilustra en la figura B.1 donde la serie original y su regresión con respecto a  $t$  se presentan en la figura (a) y la diferencia de las dos (residuo) está en la figura (b). Como se puede observar, la serie resultante carece de tendencia.



(a) Serie original y su tendencia lineal.

(b) Serie resultante sin tendencia.

Figura B.1: Substracción de la tendencia de una serie.

En otras palabras, si la serie tiene una tendencia lineal, se puede escribir como:

$$y_t = \alpha y_{t-1} + \beta t + \varepsilon_t.$$

Donde  $\beta$  es constante. Entonces, substrayendo  $\beta t$  a ambos lados, se obtiene una relación sin tendencia.

### B.1.2 Diferenciación y variables integradas

Otra forma de eliminar una tendencia determinística consiste en **diferenciar** la variable. Eso significa calcular la diferencia entre valores consecutivos de la variable, Sea  $y_t$  la variable de interés en el tiempo  $t$ . Entonces, la serie diferenciada se obtiene como:

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}.$$

La figura B.2 muestra el resultado de diferenciar la serie de la figura B.1(a). Es fácil demostrar que la serie diferenciada no tiene tendencia lineal si la original tiene una tendencia lineal.

Es posible, entonces, obtener diferencias de orden mayor como

$$\Delta^2 y_t = y_t - y_{t-2}.$$

Cuando una variable puede ser transformada en una variable estacionaria por medio de diferenciación, se denomina **integrada**. El número de diferenciaciones necesarias para lograra estacionaridad se llama el orden de integración. Se utiliza la notación  $I(q)$  para denotar una variable integrada de orden  $q$ . por lo tanto una variable que puede convertirse en estacionaria por medio de una diferenciación se llama una variable  $I(1)$ .

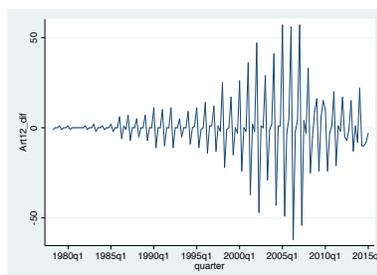


Figura B.2: Diferenciación de la serie de la figura B.1(a).

## B.2 Pruebas de hipótesis para raíces unitarias

Como hemos discutido antes, existen problemas para trabajar con modelos de regresión que involucran variables no estacionarias: las estimaciones de errores estándar son sesgadas. Por lo tanto, todas las pruebas estadísticas usadas comúnmente para determinar si existe una relación causal, dan resultados deficientes. Los sesgos implican que los criterios convencionales utilizados para decidir si existe una relación significativa entre las variables, son poco confiables. En muchos casos se encuentran relaciones significativas que no existen realmente. Estos casos reciben el nombre de **regresiones espurias** (Granger and Newbold, 1974). En consecuencia, es muy importante chequear la existencia de raíces unitarias antes de acometer cualquier proceso de modelado.

Se han diseñado varias pruebas para determinar cuando es probable que exista una raíz unitaria. Vamos a mencionar dos de las más utilizadas.

### B.2.1 Prueba de Dickey-Fuller aumentada

Uno de los modelos dinámicos más simples posibles es uno autorregresivo como:

$$y_t = \alpha y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

y estamos interesados en determinar si el resultado representa un proceso estacionario.

La prueba de Dickey-Fuller calcula una primera diferencia,

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1} = (\alpha - 1) y_t + \varepsilon_t.$$

Haciendo una prueba  $t$  sobre la variable dependiente retardada, permite probar la hipótesis de que  $\alpha - 1$  es igual a cero; o, lo que es equivalente, si  $\alpha = 1$ . Por lo tanto, la hipótesis nula es que  $\alpha = 1$ , con la hipótesis alternativa  $\alpha < 1$ .

La prueba de Dickey Fuller puede verse afectada por sesgos debidos a las correlaciones seriales de los residuos así que fue necesario diseñar una prueba de Dickey-Fuller aumentada, la cual toma en consideración tantas variables retardadas como sea necesario para garantizar que no haya correlación seriada de los residuos. Esta prueba Dickey-Fuller Aumentada (ADF) es la que se implementa hoy en día en la mayoría de los paquetes estadísticos (Enders, 2010).

### B.2.2 Otras pruebas de raíces unitarias

Existen otras pruebas de hipótesis sobre raíces unitarias y cada una tiene sus ventajas y desventajas. Mencionaremos algunas, derivadas de la prueba de la prueba Dickey-Fuller aumentada. La prueba Dickey-Fuller GLS es una adaptación de la ADF que viene precedida por una eliminación de tendencia basada en un modelo de Mínimos Cuadrados Generalizados (Generalized Least Square (GLS)).

La prueba Philips-Perron es una prueba basada en una estadística no paramétrica. Esto la hace aplicable a un conjunto de problemas mayor. Sin embargo, la estadística solo se puede demostrar que es aplicable cuando las muestras son de gran tamaño. Pero disponer de series de gran longitud suele ser muy raro en el análisis de series de tiempo. Por lo tanto, en la mayoría de los casos prácticos la prueba no es muy útil.

# Anexo: Guía de entrevista abierta

## GUÍA DE ENTREVISTA ABIERTA

Nombre del Grupo de Investigación: \_\_\_\_\_

Nombre del Líder o Integrante del Grupo: \_\_\_\_\_

Correo electrónico: \_\_\_\_\_

Fecha de Entrevista: \_\_\_\_\_

Se inicia la entrevista comentándole al experto la motivación y objetivo de la entrevista. Se realizan las siguientes preguntas:

1. ¿Con quien colaboran? y¿Qué tipo de colaboración realizan?
2. ¿Qué los lleva a decidir colaborar con otros grupos? Y ¿Qué criterios utilizan para aceptar el trabajo conjunto con otros grupos?
3. ¿Cuánto tiempo puede tardar una colaboración en concretarse?
4. ¿Cuál es el porcentaje de colaboraciones nacionales y de colaboraciones internacionales?
5. ¿Cómo es la dinámica en las colaboraciones? (cómo son los liderazgos)?
6. ¿Cuánto tiempo en promedio tardan en publicar?
7. ¿Cuál es la tasa de rechazos de publicación de artículos?

Se le solicita al experto dar su opinión sobre el panorama actual de la financiación de la investigación en malaria.



# Anexo: Productos de la tesis

Estos son los productos resultantes de la tesis, hasta la fecha:

- Ex Ante Impact Assessment of Conditional Cash Transfers Programs Using an Agent-Based Model publicado en *International Journal of Humanities and Social Sciences (IJHSS)*. ISSN(P): 2319-393X; ISSN(E): 2319-3948. Vol. 6, Issue 3, Apr-May 2017. 91-100.
- Time Series-based Bibliometric Analysis of the Dynamics of Scientific Production. Sometido a evaluación en *Scientometrics*. Febrero de 2017
- Paper “Evaluación de Impacto de Políticas y Programas a través de Micro-simulación” presentado en el XVI Congreso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica en Brasil el 19 de Octubre de 2015
- Paper “Dinámica de los Grupos de Investigación en Malaria en Colombia” presentado en el 5to Congreso Internacional de Gestión Tecnológica y de la Innovación en Bucaramanga el 25 de octubre de 2016
- Paper “Modelo de Propagación y Apropiación de una Innovación Social”, aprobado para ser presentado en XVII Congreso ALTEC 2017 que se llevará a cabo del 16 al 18 de octubre de 2017 en la Ciudad de México.
- Ponencia “Modelos Estocásticos en Evaluación de Impacto” presentada en la Convención Científica Colombiana, 2 de Julio de 2014
- Poster: Modelo de Evaluación de Impacto de Proyectos de I+D+I presentado en el Primer Coloquio Doctoral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, 1 de Julio de 2014
- Poster: Evaluación de Impacto de Políticas y Programas a través de Micro-simulación. Presentado en el II Coloquio Doctoral de la Facultad de Ingeniería. 27 de Noviembre de 2015
- Poster: Análisis Dinámico de Políticas Públicas en Investigación. 16 de septiembre presentado en el III Coloquio Doctoral de la Facultad de Ingeniería
- Estancia académica en el Banco Interamericano de Desarrollo – BID, sede Washington, para presentar y discutir avances de la tesis doctoral. Agosto de 2016.



# Bibliografía

- Andoseh, S., Bahn, R., and Gu, J. (2014). The case for a real options approach to ex-ante cost-benefit analyses of agricultural research projects. *Food Policy*, 44:218–226.
- Attanasio, O. P., Meghir, C., and Santiago, A. (2012). Education choices in Mexico: using a structural model and a randomized experiment to evaluate progress. *The Review of Economic Studies*, 79(1):37–66.
- Bass, R. F. (2011). *Stochastic processes*, volume 33. Cambridge University Press.
- Beckman, R. J., Baggerly, K. A., and McKay, M. D. (1996). Creating synthetic baseline populations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(6):415–429.
- Bernal, R. and Peña, X. (2011). *Guía práctica para la evaluación de impacto*. Number 361.25 B517. Universidad de Los Andes, Bogotá (Colombia).
- Bertrand, M., Du Fio, E., and Mullainathan, S. (2004). How much should we trust differences-in-differences estimates. *The Quarterly Journal of Economics*, 2(29):1.
- Bond, S., Harhoff, D., and Van Reenen, J. (2003). Corporate R&D and productivity in Germany and the United Kingdom. *Annales d’Economie et Statistique*.
- Bönte, W. (2004). Spillovers from publicly financed business R&D: Some empirical evidence from Germany. *Research Policy*, 33(10):1635–1655.
- Borjas, G. J. (1987). Self-selection and the earnings of immigrants.
- Bourguignon, F. (2003). *The impact of economic policies on poverty and income distribution: evaluation techniques and tools*. World Bank Publications.
- Bourguignon, F., Ferreira, F. H., and Leite, P. G. (2002). Ex-ante evaluation of conditional cash transfer programs: the case of Bolsa Escola. *World Bank Policy Research Working Paper*, (2916).
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. (2008). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley, Hoboken, N.J., 4th ed edition.

- Brandsma, A. and Kanacs, D. (2015). RHOMOLO: A Dynamic General Equilibrium Modelling Approach to the Evaluation of the European Union's R&D Policies. *Regional Studies*, 49(8):1340–1359.
- Brécard, D., Fougeyrollas, A., Le Mouel, P., Lemiale, L., and Zagamé, P. (2006). Macroeconomic consequences of European research policy: Prospects of the Nemesis model in the year 2030. *Research Policy*, 35(7):910–924.
- Brenner, T. and Werker, C. (2007). A taxonomy of inference in simulation models. *Computational Economics*, 30(3):227–244.
- Buxton, M., Hanney, S., and Jones, T. (2004). Estimating the economic value to societies of the impact of health research: a critical review. *Bulletin of the World Health Organization*, 82(10):733–739.
- Campos, P., Brazdil, P., and Mota, I. (2013). Comparing Strategies of Collaborative Networks for R&D: An agent-based study. *Computational Economics*, 42(1):1–22.
- Canova, L., Piccoli, L., and Spadaro, A. (2015). An ex ante evaluation of the revenue de solidarité active by micro–macro simulation techniques. *IZA Journal of European Labor Studies*, 4(1):1.
- Castells, M. (2011). *The rise of the network society: The information age: Economy, society, and culture*, volume 1. John Wiley & Sons.
- Chernick, M. R., González-Manteiga, W., Crujeiras, R. M., and Barrios, E. B. (2011). *Bootstrap methods*. Springer.
- Chernick, M. R. and LaBudde, R. A. (2014). *An introduction to bootstrap methods with applications to R*. John Wiley & Sons.
- Cohen, E. and Martínez, R. (2002). Formulación, evaluación y monitoreo de proyectos sociales. *División de Desarrollo Social, CEPAL*.
- Colciencias (1998). *Ciencia y sociedad: Colombia frente al reto del tercer milenio*. COLCIENCIAS.
- Colciencias (2015). Modelo de medición de grupos de investigación, desarrollo tecnológico de innovación y de reconocimiento de investigadores del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación. Technical report, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias.
- Delanghe, H. and Muldur, U. (2007). Ex-ante impact assessment of research programmes: The experience of the European Union's 7th Framework Programme. *Science and Public Policy*, 34(3):169–183.

- Deming, W. E. and Stephan, F. F. (1940). On a least squares adjustment of a sampled frequency table when the expected marginal totals are known. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(4):427–444.
- Di Comite, F., Kanacs, d., et al. (2015). Macro-Economic Models for R&D and Innovation Policies-A Comparison of QUEST, RHOMOLO, GEM-E3 and NEMESIS. Technical report, Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre.
- Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas (2013). *Definiciones unificadas para la elaboración de documentos, manuales, guías, instructivos y presentaciones*. Departamento Nacional de Planeación - DNP, Bogotá, versión 2.0 edition.
- Domencich, T. and MacFadden, D. (1975). Urban travel demand: a behavioral analysis: a charles river associates research study. *Contributions to Economic Analysis*, (93).
- Drucker, P. F. (1994). The Age of Social Transformation. *Atlantic Monthly*, 274(5).
- Efron, B. (1982). *The Jackknife, the Bootstrap and other resampling plans*. SIAM.
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of management review*, 14(4):532–550.
- Elliott, G. and Müller, U. K. (2006). Efficient tests for general persistent time variation in regression coefficients. *The Review of Economic Studies*, 73(4):907–940.
- Enders, W. (2010). *Applied Econometric Time Series*. Wiley series in probability and statistics. Wiley, Hoboken, NJ, 3rd ed edition.
- Enders, W. and Sandler, T. (1991). Causality between transnational terrorism and tourism: The case of Spain. *Studies in Conflict & Terrorism*, 14(1):49–58.
- Enders, W., Sandler, T., and Cauley, J. (1990). Assessing the impact of terrorist-thwarting policies: An intervention time series approach. *Defence and Peace Economics*, 2(1):1–18.
- Enders, W., Sandler, T., and Parise, G. F. (1992). An econometric analysis of the impact of terrorism on tourism. *Kyklos*, 45(4):531–554.
- Engle, R. F. and Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pages 251–276.
- European Commission (2005). Impact assessment and ex-ante evaluation. Commission Staff Working paper 119 final.
- Filipski, M. and Taylor, J. E. (2012). A simulation impact evaluation of rural income transfers in Malawi and Ghana. *Journal of Development Effectiveness*, 4(1):109–129.

- Forero, C., Botina, M., Bucheli, V., Charum, J., Daza, S., Duarte, A., González, C., Gutiérrez, B., Llanos, E., Murcia, C., et al. (2016). La evaluación de programas de investigación y su impacto en la sociedad colombiana. Technical report.
- Gerring, J. (2017). *Case study research: Principles and practices, 2 ed.* Cambridge University Press.
- Gertler, P. J., Martinez, S., Premand, P., Rawlings, L. B., and Vermeersch, C. M. (2011). *Impact evaluation in practice.* World Bank Publications.
- Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., and Trow, M. (1994). *The new production of knowledge: The dynamics of science and research in contemporary societies.* Sage.
- Godin, B. and Doré, C. (2004). Measuring the impacts of science: Beyond the economic dimension. *History and sociology of S&T statistics.*
- Gottschalk, I. (2012). Ex-Ante Evaluation of the Conditional Cash Transfers of the Brazilian Bolsa. Master's thesis, Tilburg University.
- Graham, K. E., Chorzempa, H. L., Valentine, P. A., and Magnan, J. (2012). Evaluating health research impact: Development and implementation of the alberta innovates-health solutions impact framework. *Research Evaluation*, 21(5):354–367.
- Granger, C. W. and Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of econometrics*, 2(2):111–120.
- Graupner, M. et al. (2011). The spatial agent-based competition model (spabcom)[das räumliche agenten-basierte wettbewerbsmodell spabcom]. Technical report, Leibniz Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe (IAMO).
- Griffith, R., Harrison, R., and Van Reenen, J. (2004). How special is the special relationship? using the impact of US R&D spillovers on uk firms as a test of technology sourcing.
- Griliches, Z. (1979). Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth. *The bell journal of economics*, pages 92–116.
- Grindle, M. S. (1997). *Getting Good Government: Capacity Building in the Public Sector of Developing Countries*, chapter The good government imperative: human resources, organizations, and institutions. Harvard Institute for International Development.
- Hall, B. H. and Mairesse, J. (1995). Exploring the relationship between R&D and productivity in French manufacturing firms. *Journal of econometrics*, 65(1):263–293.
- Hall, B. H., Mairesse, J., and Mohnen, P. (2009). Measuring the returns to R&D. Technical report, National Bureau of Economic Research.

- Hall, B. H., Mansfield, E., and Jaffe, A. B. (1993). Industrial research during the 1980s: Did the rate of return fall? *Brookings papers on economic activity. Microeconomics*, 1993(2):289–343.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time series analysis*. Princeton university press Princeton.
- Harding, A. (2007). Challenges and opportunities of dynamic microsimulation modelling. In *1st General Conference of the International Microsimulation Association, Vienna*, volume 21.
- Holbrook, J. B. and Frodeman, R. (2011). Peer review and the ex ante assessment of societal impacts. *Research Evaluation*, 20(3):239–246.
- Jaramillo, H. and Forero, C. (2001). Interacción entre capital humano, capital social y capital intelectual. In Torres, R. and Restrepo, G., editors, *El Contexto del Nuevo contrato Social. V taller Iberoamericano e Interamericano de indicadores de Ciencia y Tecnología*.
- Jaramillo, H., Lopera, C., González, B., and Vecino, A. (2009). Impacto del financiamiento en investigación en salud colciencias 1970-2007. *Informe final. Bogotá, Colciencias*.
- Kanninen, S. and Lemola, T. (2006). *Methods for evaluating the impact of basic research funding*. Academy of Finland.
- Khandker, S. R., Koolwal, G. B., and Samad, H. A. (2010). *Handbook on impact evaluation: quantitative methods and practices*. World Bank Publications.
- Khuri, A. I. and Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2):128–149.
- Leal, J. (2005). *Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*. CEPAL.
- Lee, J.-W. (1995). Capital goods imports and long-run growth. *Journal of development economics*, 48(1):91–110.
- Leite, P. G., Narayan, A., and Skoufias, E. (2011). How do ex ante simulations compare with ex post evaluations? Evidence from the impact of conditional cash transfer programs. *World Bank Policy Research Working Paper Series*.
- Li, J. (2011). *Dynamic microsimulation for public policy analysis*, volume 24. Jinjing Li.
- Li, J., O’Donoghue, C., et al. (2012a). A methodological survey of dynamic microsimulation models. Technical report, United Nations University-Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT).
- Li, J., O’Donoghue, C., et al. (2012b). Simulating histories within dynamic microsimulation models. *International Journal of Microsimulation*, 5(1):52–76.

- Luenberger, D. (1979). *Introduction to dynamic systems: theory, models, and applications*. Wiley.
- Mamuneas, T. P. and Nadiri, M. I. (1996). Public R&D policies and cost behavior of the US manufacturing industries. *Journal of Public Economics*, 63(1):57–81.
- Marschak, J. (1953). Economic measurements for policy and prediction. studies in econometric method. *Studies in Econometric Methods*.
- McCleary, R., Hay, R. A., Meidinger, E. E., and McDowall, D. (1980). *Applied time series analysis for the social sciences*. Sage Publications, Beverly Hills, CA.
- Monroy, S. (2004). Nuevas políticas y estrategias de articulación del sistema de ciencia, tecnología e innovación colombiano. *Innovar*.
- Monroy, S. (2010). *Innovación, Desafío para el Desarrollo en el Siglo XXI*, chapter Gestión del Conocimiento en las Sociedades Contemporáneas. Cátedra José Celestino Mutis, Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Monroy, S. and Diaz, H. (2017). Ex ante impact assessment of conditional cash transfer programs using an agent-based model. *International Journal of Humanities and Social Sciences*, 6(3).
- Nelson, R. R. and Winter, S. G. (2009). *An evolutionary theory of economic change*. Harvard University Press.
- Nonaka, I. and Takeuchi, H. (1995). *The knowledge creation company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press. New York, USA.
- Nowok, B., Raab, G. M., Snoke, J., Dibben, C., and Nowok, M. B. (2016). Package ‘synthpop’. *Compare*, 3:1.
- Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (2015). Indicadores de Ciencia y Tecnología–Colombia 2014. Technical report.
- OCDE (2002). *Glossary of key terms in evaluation and results based management*. Organisation for Economic Cooperation and Development.
- Olmedo, R. P. (1980). La política tecnológica de los países desarrollados.
- Orcutt, G. H. (1957). A new type of socio-economic system. *The review of economics and statistics*, pages 116–123.
- Ortegón, E. and Prieto, A. (2005). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*, volume 42. United Nations Publications.

- Parker, S. W., Rubalcava, L., and Teruel, G. (2007). Evaluating conditional schooling and health programs. *Handbook of development economics*, 4:3963–4035.
- Penfield, T., Baker, M. J., Scoble, R., and Wykes, M. C. (2013). Assessment, evaluations, and definitions of research impact: A review. *Research Evaluation*, page rvt021.
- Perron, P. (1989). The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pages 1361–1401.
- Quenouille, M. H. (1949). Approximate tests of correlation in time-series. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 11(1):68–84.
- Reinsel, G. C. (2003). *Elements of multivariate time series analysis*. Springer Science & Business Media.
- Research Council UK (2017). Pathways to impact. <http://www.rcuk.ac.uk/innovation/impacts/>. Consultado 12 de enero de 2017.
- Roberts, C. (1999). Possible bias due to panel membership in the 1996 research assessment exercise. *Research Fortnight*, 6:1–2.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of political Economy*, 98(5, Part 2):S71–S102.
- Roy, A. D. (1951). Some thoughts on the distribution of earnings. *Oxford economic papers*, 3(2):135–146.
- Rubin, D. B. (1974). Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies. *Journal of educational Psychology*, 66(5):688.
- Ruegg, R. and Jordan, G. (2007). Overview of evaluation methods for R&D programs. *A Directory of Evaluation Methods Relevant to Technology Development Programs, prepared for US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*.
- Sagasti, F. and García, C. d. J. Z. (2010). Ciencia, tecnología, innovación: Políticas para américa latina. *Compartir*, (14).
- Sahrbacher, C., Sahrbacher, A., and Balmann, A. (2014). Parameterisation of agripolis: A model of agricultural structural change. In *Empirical Agent-Based Modelling-Challenges and Solutions*, pages 105–121. Springer.
- Sahrbacher, C., Sahrbacher, A., Kellermann, K., Happe, K., Balmann, A., Brady, M., Schnicke, H., Ostermeyer, A., and Schönau, F. (2012). Odd-protocol of agripolis. *IAMO [Electronic]*, Disponible: [http://www.agripolis.de/documentation/ODD\\_AgriPoliS.pdf](http://www.agripolis.de/documentation/ODD_AgriPoliS.pdf).

- Smajgl, A. and Barreteau, O. (2014). *Empiricism and Agent-Based Modelling*, pages 1–26. Springer New York, New York, NY.
- StataCorp, L. (2014). *Stata Time-series: Reference Manual. Release 13*. StataCorp LP.
- Sutcliffe, S. et al. (2006). A toolkit for progressive policymakers in developing countries.
- Todd, P. and Wolpin, K. I. (2003). Using a social experiment to validate a dynamic behavioral model of child schooling and fertility: Assessing the impact of a school subsidy program in Mexico. *PIER Working Paper*.
- Todd, P. E. and Wolpin, K. I. (2006). Assessing the impact of a school subsidy program in Mexico: Using a social experiment to validate a dynamic behavioral model of child schooling and fertility. *The American Economic Review*, 96(5):1384–1417.
- Tomlinson, S. (2000). The research assessment exercise and medical research. *BMJ*, 320(7235):636–639.
- Trang, N. T., Takezawa, N., and Takezawa, N. (2002). Real options and the evaluation of research and development projects in the pharmaceutical industry: A case study. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 45(4):385–403.
- Tukey, J. W. (1958). Bias and confidence in not-quite large samples. *Ann. Math. Statist.*, 29:614.
- Universidad Nacional de Colombia. Vicerrectoría de Investigación (2009). *Capacidades de investigación en la Universidad Nacional de Colombia 2000 - 2008. Una aproximación desde el capital intelectual*.
- Vasco, G. (2012). Guía de evaluación de políticas públicas del gobierno vasco. *Plan de Innovación pública*.
- Villaveces, J. L. (2004). Notas hacia un documento sobre la medición del impacto de la ciencia y tecnología.
- White, H., Sabarwal, S., et al. (2016). Diseño y métodos cuasiexperimentales. Technical report, Unicef.
- Wilensky, U. and Evanston, I. (1999). Netlogo: Center for connected learning and computer-based modeling. *Northwestern University, Evanston, IL*, pages 49–52.
- Wise, D. A. (1985). A behavioral model versus experimentation: The effects of housing subsidies on rent. *Methods of Operations Research*, 50:441–89.
- Yates, R. D. and Goodman, D. J. (1998). *Probability and Stochastic Processes: S*. John Wiley & Sons.
- Yin, R. K. (1981). The case study as a serious research strategy. *Knowledge*, 3(1):97–114.

- Yin, R. K. (2013). *Case study research: Design and methods*. Sage publications.
- Zagamé, P., Boitier, B., Fougeyrollas, A., Le Mouël, P., Capros, P., Kouvaritakis, N., Bossier, F., Thierry, F., and Melon, A. (2010). The NEMESIS reference manual. Disponible en: [www.erasme-team.eu/files/Manual\\_Part\\_I.pdf](http://www.erasme-team.eu/files/Manual_Part_I.pdf). Consultado octubre 2013.
- Zucchelli, E., Jones, A. M., Rice, N., et al. (2012). The evaluation of health policies through dynamic microsimulation methods. *International Journal of Microsimulation*, 5(1):2–20.