



“Landuse, biofuels and rural development in the La Plata Basin”

IDRC Grant ID 104783-001

Modelos Basados en Agentes (MBA): definición, alcances y limitaciones

Carolina Cardoso

Ecole doctorale ABIES -AgroParisTech Paris, France

Federico Bert

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía and Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA) Buenos Aires, Argentina

Guillermo Podestá

University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science Miami, Florida, USA

Objetivos del documento

Este documento describe de manera breve los principales conceptos de los Modelos Basados en Agentes. El documento es un texto introductorio simple para orientar a quienes no han tenido contacto previo con esta técnica de modelación y prevean que puede ser de utilidad para sus investigaciones. Por este motivo, el documento incluye una breve definición de los Modelos Basados en Agentes, sus componentes, su potencial utilidad, sus ventajas y algunas guías para definir si esta técnica es apropiada para el problema que se desea resolver.

El contenido del documento se basa en la literatura (artículos científicos, libros y capítulos de libros), sitios web, reportes, y experiencia de los autores sobre la metodología de Modelación Basada en Agentes y sobre ejemplos de aplicación de los mismos. Al final del documento se incluyen citas de algunas de estas fuentes.

¿Qué son los Modelos Basados en Agentes (ABM)?

Un modelo es una representación simplificada de la realidad. Así, un modelo representa de manera simplificada los diferentes componentes y procesos que forman parte del sistema en estudio. El proceso de construcción de un modelo contribuye a identificar, seleccionar y ordenar la información disponible en relación al funcionamiento del sistema de estudio. El modelo – resultado del proceso de modelación – y la simulación (“corrida” en el tiempo del modelo) constituye una herramienta útil para comprender



el funcionamiento de un sistema y evaluar la respuesta del mismo a cambios en diferentes componentes internos o externos del sistema.

La modelación basada en agentes es una técnica de modelación que complementa los métodos analíticos tradicionales. En los modelos basados en agentes (MBA) – también conocidos como sistemas multi-agentes, sistemas basados en agentes, etc. - un sistema es modelado como una colección de entidades autónomas de toma de decisión llamadas agentes. Cada agente evalúa su situación y toma decisiones sobre la base de un conjunto de reglas de decisión. A diferencia de los métodos analíticos, que se enfocan en modelar y caracterizar el equilibrio de un sistema (enfoque “top-down”), los modelos basados en agentes ofrecen la posibilidad de generar (i.e., modelar) ese equilibrio. En este sentido, los ABM tienen un enfoque “bottom-up”: esto significa que el modelador representa el comportamiento y las interacciones de los agentes individuales y objetos locales que componen el sistema y obtiene como resultado un patrón de comportamiento a nivel del sistema (ver también fenómeno de emergencia; punto 2).

Un MBA está compuesto de una colección de agentes, un ambiente a través del cual los agentes interactúan y reglas que definen las relaciones entre agentes y su ambiente y que determinan la secuencia de acciones en el modelo (Parker et al. 2003). Los agentes son entidades físicas o virtuales que toman decisiones de manera autónoma. Pueden representar átomos, células, animales, gente u organizaciones dependiendo de su aplicación. El ambiente es el espacio virtual en el que interactúan los agentes (e.g., puede representar un espacio geográfico). Los agentes tienen recursos propios (e.g., tierra, capital), objetivos (e.g., maximizar su renta, disminuir riesgo) y capacidades sensoriales, es decir, tienen información sobre atributos y estado de otros agentes y del ambiente. Los agentes toman decisiones en base a las reglas y funciones analíticas prescritas por el modelador; las decisiones se basan en la información que el agente tiene disponible (información propia, sobre otros agentes y sobre el ambiente). A través sus decisiones los agentes reaccionan y se adaptan a situaciones o condiciones del ambiente.

¿Para qué sirven los MBA?

Los sistemas complejos se caracterizan por las interdependencias, heterogeneidad y jerarquías anidadas de sus componentes (individuos, actores diversos, espacio, etc.). Las interdependencias pueden existir entre los actores, entre los actores y espacio biofísico y a lo largo del tiempo. A su vez, existe heterogeneidad entre actores, en el espacio biofísico, y a lo largo del tiempo. Finalmente, las estructuras jerárquicas surgen, por ejemplo, cuando individuos se reúnen para formar una familia u organización. Cuando un sistema combina interdependencia entre sus componentes y heterogeneidad de los mismos (i.e. sistema complejo) las soluciones analíticas – que asumen agentes homogéneos - son difíciles de obtener. Los MBA son apropiados para tratar este tipo de situaciones.



Dadas las interdependencias, heterogeneidades y jerarquías de un sistema complejo, el comportamiento global del mismo no puede explicarse a través de la extrapolación del comportamiento de sus componentes individuales. Es decir, las propiedades y dinámica a escala global de un sistema complejo son diferentes de las de la escala local e impredecibles en base al análisis de esas propiedades locales; este es el concepto de “emergencia”. En este sentido, Von Neumann explica que el comportamiento de un sistema es infinitamente más difícil de caracterizar que sus reglas de funcionamiento locales. Sin embargo, la caracterización a través de reglas simples del funcionamiento local del sistema puede llevar a comportamientos globales emergentes muy complejos.

Los MBA se basan en el concepto descrito en el párrafo anterior de que **el todo es más que la suma de sus partes** y es imprevisible en base a las propiedades de las partes. Así, los ABMs ofrecen la posibilidad de comprender la articulación entre el nivel local y el nivel global de un sistema complejo. Como se mencionó previamente, la aproximación “bottom-up” de los MBA apunta a describir las características de las partes del sistema y definir su comportamiento a través de reglas simples. De esta manera, los MBA son herramientas útiles para estudiar el comportamiento que emerge de un sistema complejo como resultado de las características de los componentes del sistema y el funcionamiento de los mismos.

La figura de abajo esquematiza ejemplos de sistemas complejos cuyo comportamiento global **emerge** de las interdependencias, heterogeneidades y jerarquías en sus componentes. Por ejemplo, la forma y movimiento de una bandada de pájaros no puede predecirse en base al entendimiento del comportamiento de un pájaro individual. La misma es un patrón que emerge como resultado de las características de los pájaros que la componen, su comportamiento y las interacciones entre ellos. Los paisajes son patrones de organización espacial que emergen de las acciones de los agricultores heterogéneos, que componen el sistema, y de sus interacciones entre ellos y su ambiente. Factores definidos como externos al sistema en el modelo (e.g., precios) también influyen la toma de decisiones de los agricultores y en consecuencia los patrones que emergen de sus decisiones. El comportamiento psicológico de los individuos también es un comportamiento emergente resultado de procesos y componentes internos (neuronas, sinapsis, etc.) y externos (e.g., ambiente socio-cultural).

En resumen, los MBA ofrecen una herramienta para desarrollar modelos computacionales de como los agentes actúan e interactúan entre sí y con el ambiente que los rodea para describir patrones de comportamiento y organización emergentes de un sistema. A su vez, los MBA representan las retroalimentaciones que ocurren dentro del sistema y permiten evaluar como el comportamiento individual de los agentes es influenciado y se adapta por el funcionamiento del sistema.

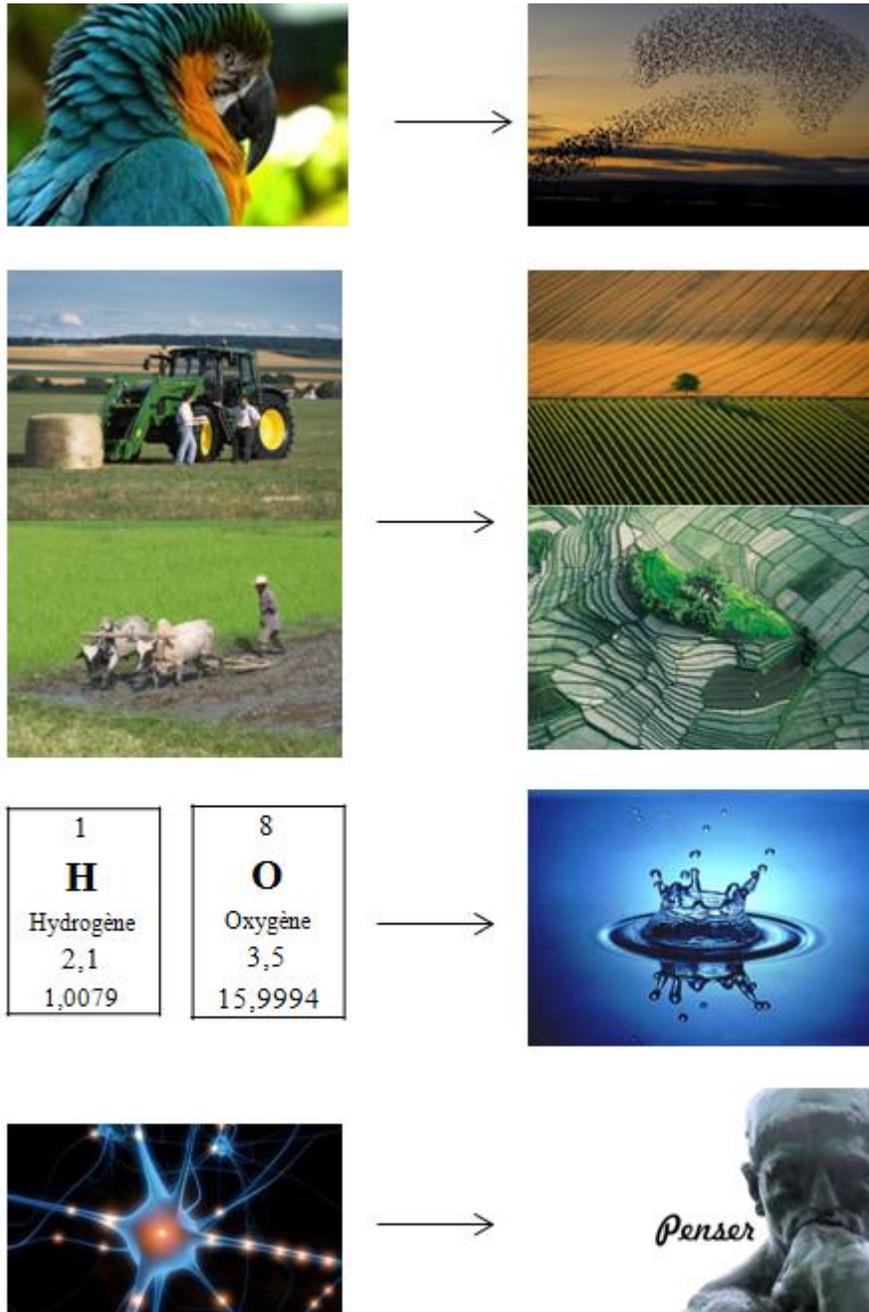


Figura 1. Ejemplos de fenómenos emergentes. Pajaro => Bandada; Finca => Paisaje; Oxígeno más hidrógeno => Agua; Neurona => Pensamiento cognitivo. En cada ejemplo, “el todo es más que la suma de sus partes”, porque el sistema actúa y reacciona de manera diferente de sus partes.



¿Qué ventajas tienen los MBA?

La gran ventaja de los MBA es la posibilidad de descubrir y explicar el comportamiento emergente de sistemas complejos como resultado de las características y comportamiento de las partes del mismo. Así, esta aproximación no necesita basarse en asunciones exógenas o imposiciones de equilibrio del sistema, sino que el comportamiento del mismo surge endógenamente (bottom-up).

Otra ventaja de los MBA se basa en que permiten incorporar las características de los sistemas complejos: interdependencia, heterogeneidad, y jerarquías. Los MBA permiten incluir interacciones explícitas e implícitas entre agentes y agentes y su ambiente. Para esto el modelador explicita reglas que definen como los agentes interactúan entre sí en el marco de la red social que forman (e.g., agentes que imitan a otros, agentes que reciben información de otros agentes, agentes que compiten por arrendar una misma finca, etc.) y con su ambiente. Asimismo, los agentes y el ambiente (el espacio virtual en donde conviven los agentes) de un MBA pueden ser caracterizados por atributos propios y distintivos. De este modo, los agentes pueden ser heterogéneos en cuanto a sus características financieras, económicas, sociales, de personalidad, estructurales, ubicación, etc. A su vez, la heterogeneidad se observa en el ambiente con variaciones espaciales en la cantidad y calidad de recursos naturales (e.g. suelo), distancia puntos de venta, etc. Finalmente, los MBA pueden incluir más de un tipo de agente y organización de los mismos. (e.g., agentes productores, agente gobierno). De esta manera pueden existir diferentes jerarquías que modulan el comportamiento individual de los agentes.

Sin embargo, las ventajas de los MBA no sólo radican en la aproximación bottom-up: simulación del comportamiento global de un sistema en base al comportamiento de sus partes. Como se mencionó anteriormente, dado que los MBA consideran las interacciones entre las partes del sistema, pueden reflejar las retroalimentaciones del mismo. Así, no sólo es posible estudiar comportamientos emergentes sino que también permiten estudiar la reacción y adaptación de las partes del sistema en respuesta al comportamiento global del mismo o factores externos al mismo (e.g., clima, precios) – estos últimos impuestos por el modelador.

Con estas ventajas, los MBA ofrecen a las ciencias sociales verdaderos “laboratorios virtuales” donde se puede experimentar y estudiar interacciones y comportamiento de individuos heterogéneos en un ambiente heterogéneo, sometidos a eventuales organizaciones jerarquizadas. En este sentido, los MBA han sido (y son) muy usados en las ciencias sociales. Además, los MBA (como otros modelos) contribuyen a cuantificar y formalizar información y conocimiento. Así los MBA, pueden ser complementarios a las metodologías y estudios sociológicos y ofrecen una oportunidad de integrar conocimientos de diversas disciplinas (o sea: una oportunidad para intentar el “pensamiento complejo” mencionado por Edgar Morin). Así los MBA proveen un conjunto de herramientas para transformar



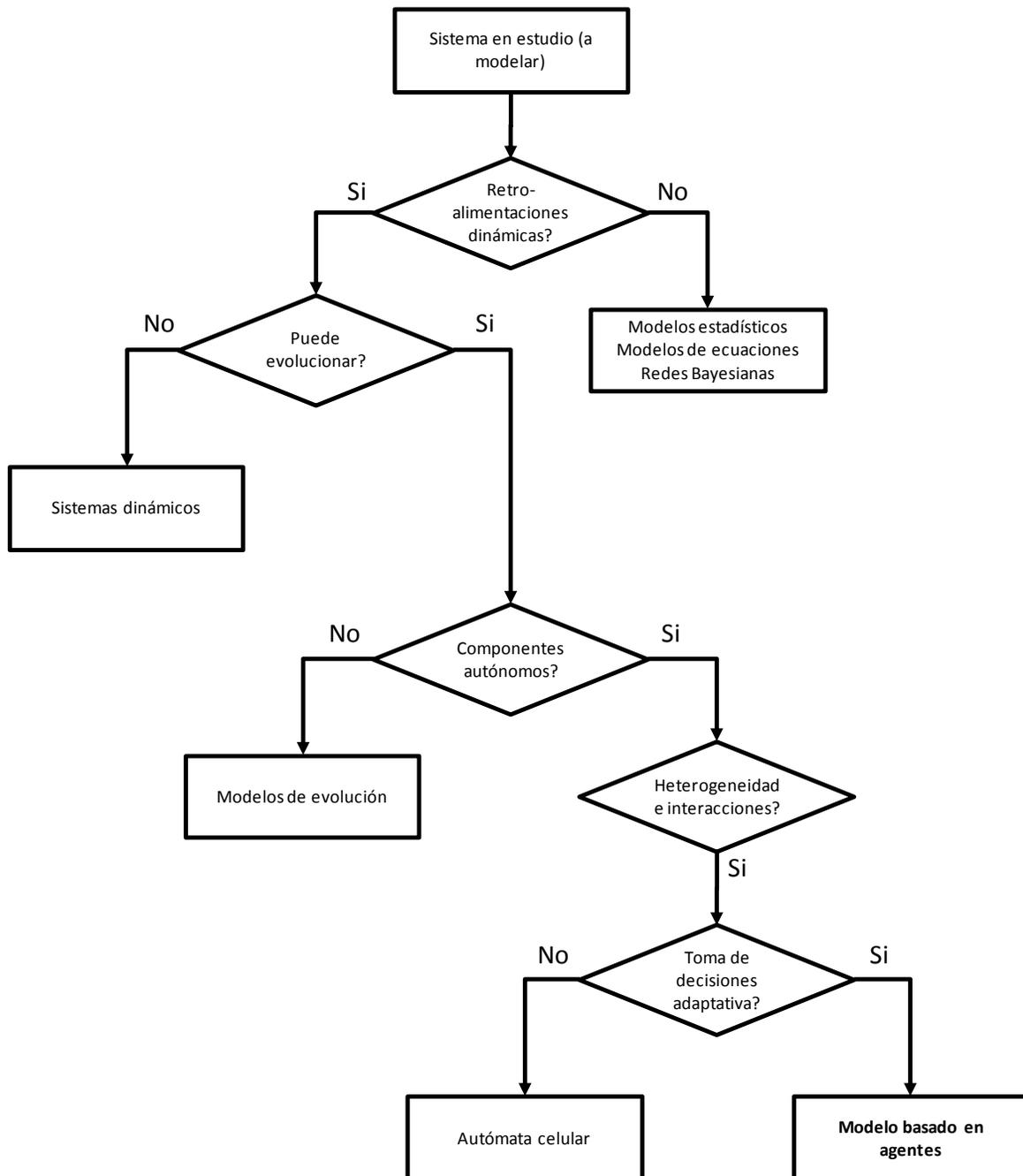
teorías verbales de mecanismos complejos en modelos precisos y específicos que pueden generar anticipaciones en base a distintos escenarios y explicaciones, muchas de las cuales son emergentes. Esta herramienta se expandió, tal vez por su capacidad a modelar “interacciones” complejas: un factor común y trascendente entre varias disciplinas.

¿Cuándo (en qué casos) necesitamos usar MBA?

Si el sistema en estudio tiene alguna de las características que a continuación se listan, es posible que un MBA sea una aproximación apropiada para simularlo de manera más realista:

- **Interacciones complejas:** en el sistema existen interacciones entre agentes, no-lineales, discontinuas o discretas (de manera de que el comportamiento de un agente puede ser dramáticamente alterado por otros agentes). En estos casos, describir los comportamientos con aproximaciones tradicionales (e.g., ecuaciones diferenciales) puede ser muy difícil.
- **Poblaciones heterogéneas:** existen distintos tipos de componentes (agentes) formando parte del sistema y, a su vez, componentes del mismo tipo muestran atributos o características diferentes. Las aproximaciones de modelación tradicionales representan un componente (agente) con características promedio.
- **Complejidad topológica:** La topología de las interacciones entre los componentes del sistema en estudio es heterogénea y compleja. Esto es principalmente importante para procesos sociales (en donde existe aprendizaje y adaptación) y físicos. Representar de manera realista la topología de las relaciones entre agentes puede ser necesario para explicar adecuadamente el comportamiento agregado o global del sistema.
- **Comportamientos complejos:** Los MBA pueden ser un aproximación apropiada cuando las entidades o individuos del sistema tienen un comportamiento que: (a) es muy complejo para describirlo a través de ecuaciones (b) no puede ser claramente definido a través de tasas de transición agregadas, (c) es estocástico.
- **Espacialidad:** Los MBA pueden ser fundamentales para modelar sistemas en donde el componente espacial es relevante en el funcionamiento del mismo. En este sentido, los MBA tienen la flexibilidad de representar agentes que se mueven en el espacio y características del ambiente que varían espacialmente. Además, las interacciones entre agentes también pueden depender del espacio e incorporar esto a través de ecuaciones sería mucho más complejo. Por ejemplo, el comportamiento global puede cambiar de forma drástica por causa de una variación simple del medio-ambiente (la ecología ilustra varios ejemplos de esto).

Heckbert et al. (2010) sugieren en el siguiente diagrama guías para definir los modelos/herramientas más apropiados según las características del sistema en estudio. En este mismo trabajo se hace una completa descripción de cada aproximación y de las ventajas de cada una según la aplicación.





Usualmente, los MBA no son necesarios. Esto ocurre cuando hay un número reducido de agentes, un gran número de agentes pero del mismo tipo, que tienen características similares (no son heterogéneos) o que interactúan aleatoriamente, los MBA no son necesarios. En estos casos, un conjunto de ecuaciones diferenciales (como los modelos de dinámica de sistemas) quizás sean la herramienta más apropiada.

Verificación, calibración y validación de los MBA

La verificación, calibración y validación de los MBA es un aspecto que merece mucha atención. La verificación significa asegurar que el modelo es correcto y funciona correctamente (en inglés: “getting the model right”). La validación – de la estructura del modelo y de los resultados de simulación- es asegurar que el modelo representa adecuadamente el sistema en estudio (en inglés: “getting the right model”).

La verificación intenta asegurar que la implementación del modelo se corresponde con su diseño; involucra el chequeo de que el modelo se comporta como se esperaba. Luego del desarrollo e implementación de cada componente del modelo, se sugiere aplicar – al menos - tres procedimientos complementarios para verificar la operación del modelo. Primero, se sugiere que el/los modelador/es realicen una “caminata sobre el código” en la cual el programador lee cada línea de código y explica su funcionalidad al resto del equipo. Este procedimiento asegura que todos los conceptos de diseño y especificaciones están correctamente reflejadas en el código. Segundo, se sugiere implementar unidades de testeo para cada sub-modelo. Estas unidades corren parte del modelo en una manera controlada (el “contexto” de la corrida es especificado en la unidad de testeo). Así, es posible comparar los resultados numéricos producidos por el modelo y los calculados externamente en un sistema independiente (e.g., planilla de Excel). Por último, para verificar que todas los diferentes sub-modelos están funcionando correctamente en su conjunto puede correrse el modelo con un número pequeño de agentes (un “mundo pequeño” y examinar los resultados detalladamente (e.g., analizando la historia de vida de un agente específico). Esta verificación integral del modelo no es posible si se realiza una corrida normal involucrando a todos los agentes del sistema (a no ser que estos sean muy poco, situación en la que quizás no se justifique utilizar MBA).

Hay muchas discusiones acerca de la validación de los MBA y aproximaciones para realizarla. Algunos de las aproximaciones fueron descritas por Parker et al. (2003). La literatura coincide en que deberían adoptarse más de una estrategia ya que las mismas suelen ser complementarias. En primer lugar, es aconsejable involucrar a los actores (reales) del sistema en modelación en el diseño del modelo y evaluación de los resultados preliminares. La incorporación de actores del sistema permite realizar un diseño válido y realista de los procesos y mecanismos involucrados en el mismo. A su vez, esta aproximación es consistente con la visión de que la “validez” de un modelo es dependiente del propósito del mismo. En segundo lugar, se sugiere una validación similar a la utilizada con modelos tradicionales: evaluar la consistencia entre los patrones simulados por el modelo y la información



histórica disponible o teorías existentes. Sin embargo, dada la complejidad de los sistemas modelados por los MBA son muchas las variables simuladas y no siempre se dispone de información histórica detallada para evaluar la consistencia. Usualmente, sólo es posible validar el comportamiento de partes del modelo o solamente evaluar la tendencia y magnitud de los patrones simulados en relación a los datos disponibles o documentos históricos. Por último, dadas las dificultades para realizar una validación convencional, el esfuerzo de validación de los MBA es recomendable que incluya una comparación de los resultados con otro modelo analítico independiente (comparación modelo-modelo, M2M). Estudios recientes han mostrado que aunque puede haber diferencias entre resultados de ambos modelos en algunos casos, la comparación permite obtener información útil sobre su comportamiento. Finalmente, la calibración del modelo suele darse de manera simultánea a la validación, independientemente de la estrategia de validación utilizada. Durante el proceso de validación se revisan los valores asignados a atributos de agentes, parámetros y datos de entrada del modelo de manera de ajustar los resultados simulados.

Diseño e implementación y documentación de un MBA

El diseño e implementación de un MBA no es algo sencillo. El diseño - construcción del modelo conceptual representativo del sistema estudiado - es posiblemente la etapa más compleja y requiere que el/los modelador/es conozcan con detalle el funcionamiento del sistema y las diferentes aproximaciones (disponibles en la literatura) para modelar las partes y procesos del mismo. La implementación -construcción del modelo funcional/software en base al modelo conceptual - también tiene su propia dificultad, aunque puede ser fluida si la etapa de diseño fue completa y detallada, si se utilizan herramientas disponibles especializadas para el desarrollo de MBA y si se dispone de programadores capacitados (esto no implica que no pueda implementarse un modelo simple sin tener amplios conocimientos de programación).

Existen guías en la literatura para conducir el proceso de diseño de un MBA (e.g., Gilbert & Terna 2000 y Grimm & Railsback 2005). La fase de diseño debería resultar en una formulación detallada del modelo, incluyendo (1) una clara enunciación del/los problema/s a modelar, (2) una descripción de los tipos de agentes involucrados (e.g., productores, gobierno, etc.) y las variables de estado y parámetros que los describen, (3) una descripción del espacio (ambiente) en el cual los agentes interactuarán, y las variables de estados y parámetros que lo describe (4) descripción de eventuales variables externas al modelo que pueden influenciarlo (e.g. mercado, clima, políticas, etc.) y (5) un resumen de los principales sub-modelos de los procesos considerados y la dinámica de funcionamiento de los mismos (e.g., proceso de toma de decisiones de los agentes, secuencia de acciones de los agentes, etc.). Los diagramas UML (Unified Modeling Language; e.g., de software <http://staruml.sourceforge.net/en/>) son herramientas útiles para realizar el diseño del modelo dado que ofrecen la posibilidad de pensar e ir construyendo el modelo conceptual según varios ángulos (componentes, decisiones de los actores, etc.).



En relación a la implementación de un MBA, existen diferentes herramientas que facilitan la misma. La programación orientada a objetos es la aproximación convencional para implementar un ABM dado que la misma permite crear código que representa de manera más realista el sistema modelado. Existen plataformas que reducen significativamente los esfuerzos de programación. Además, existen revisiones que identifican las ventajas y desventajas de cada uno de ellos (e.g., Tobias & Hofmann 2004). La siguiente tabla presenta una lista - no exhaustiva - de las plataformas disponibles para la implementación de MBA.

Tabla 1: Ejemplo de algunas de las plataformas actuales para la creación de MBA para las ciencias sociales (extraído de Na Alessa et al, 2006).

Plataforma	Sitio web	Desarrollado sobre
REPAST (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit)	http://repast.sourceforge.net	JAVA
ASCAPE	http://www.brook.edu/es/dynamics/models/ascape/	JAVA
NETLOGO	http://ccl.northwestern.edu/netlogo/	JAVA
STARLOGO	http://education.mit.edu/starlogo/	SMALLTALK
AGENTSHEETS	http://www.agentsheets.com/	SMALLTALK
CORMAS (Software for Renewable Resource Management)	http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm	SMALLTALK
BREVE	http://www.spiderland.org/	C
SWARM (Multi-simulation of complex systems)	http://www.swarm.org	C
ORGAHEAD (Organizational learning model)	http://www.casos.cs.cmu.edu/projects/OrgAhead/	

Finalmente, a diferencia de los modelos matemáticos o analíticos, los MBA inicialmente no tuvieron un lenguaje estándar o protocolo para su comunicación. Sin embargo, la comunicación de un MBA es crucial para asegurar su transparencia (describir su estructura, mecanismos y asunciones) y la repetibilidad de los resultados. A su vez, la comunicación de un MBA no es sencilla dada la complejidad del sistema que se representa y del modelo en sí mismo. Para organizar la documentación de los MBA, Grimm et al. (2006) propusieron un protocolo estándar llamado ODD (Overview, Design concepts, and Details) que apunta a la descripción de modelos basados en agentes en ecología, con vistas a su



aplicación en simulación social basada en agentes y otras disciplinas. Desde su publicación, el protocolo ha sido utilizado exitosamente para describir varios modelos. Durante 2010, Grimm et al. Publicaron una revisión y primera actualización del protocolo ODD. Se recomienda fuertemente basar la descripción de cualquier MBA en el protocolo ODD revisado.

Comentarios finales

Este documento presentó los principales conceptos de la modelación basada en agentes. Luego de una descripción de los elementos que conforman un MBA se presentaron las ventajas y utilidades de los mismos. Asimismo se propusieron y revisaron guías para identificar situaciones en donde esta técnica de modelación puede ser ventajosa (en relación a otras). A modo de resumen, en la siguiente tabla se resumen las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de los MBA para a modelación de de sistemas complejos según lo descrito en este documento:

Fortalezas	Debilidades (o desafíos)
<ul style="list-style-type: none">• Flexibilidad de incorporar propiedades de los sistemas complejos• Capacidad de reproducir fenómenos emergentes complejos• Laboratorio virtual para entender y evaluar comportamiento de sistemas complejos	<ul style="list-style-type: none">• Dificultades para la calibración y la validación• Identificación y formalización de los múltiples componentes e interacciones de un sistema complejo• Dificultad para comunicar la estructura y funcionamiento del modelo y replicar los resultados
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none">• Cuantificar, formalizar y generar información y conocimiento• Dialogo interdisciplinar e integración de conocimiento de diferentes disciplinas• Entender y describir comportamientos complejos del sistema en estudio para informar a los actores que toman decisiones sobre el mismo	<ul style="list-style-type: none">• Críticas de otras áreas de la ciencia que cuestionan la validez de los MBA como herramienta científica dada las dificultades para su completa validación• No ser critico ante los resultados de un ABM• Intentar modelar todos los detalles de un sistema complejo (que son muchos) perdiendo de vista la estructura e interacciones relevantes del mismo



ANEXO I: Referencias útiles sobre MBA

- ***Generales:***

Castle, C. J. E. & A. T. Crooks. 2006. Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations. In *Working Papers Series*, ed. Centre for Advanced Spatial Analysis - London: University College. Available from: www.casa.ucl.ac.uk.

Macal, C. M. & M. J. North. 2008. Agent-based modeling and simulation: ABMS examples. In: S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler eds., *Proceedings - Winter Simulation Conference*, p. 101-112.

Samuelson, D. A. & C. M. Macal (2006) Agent-Based Simulation Comes of Age: Software opens up many new areas of application. *Operations Research Management Science*, 33, 34-38.

Although the next three references are listed also in separate sections, they are extremely useful for an overview of the approaches

Macy, M. W. & R. Willer (2002) From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling. *Annual Review of Sociology*, 28, 143-166.

Heckbert, S., T. Baynes & A. Reeson (2010) Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185, 39-53.

Parker, D., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann & P. Deadman (2003) Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change. *Annals of the Association of American Geographers*, 94, 314-337.

- ***Cambios en el uso de la tierra***

Matthews, R., N. Gilbert, A. Roach, J. Polhill & N. Gotts (2007) Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 22, 1447-1459.

Parker, D., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann & P. Deadman (2003) Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change. *Annals of the Association of American Geographers*, 94, 314-337.

- ***Ecosistemas y recursos naturales***

Bousquet, F. & C. Le Page (2004) Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176, 313-332.



Jager, W. & H. J. Mosler (2007) Simulating Human Behavior for Understanding and Managing Environmental Resource Use. *Journal of Social Issues*, 63, 97-116.

Speelman, E. N. & L. E. García-Barrios (2010) Agrodiversity v.2: An educational simulation tool to address some challenges for sustaining functional agrodiversity in agro-ecosystems. *Ecological Modelling*, 221, 911-918.

- **Sistemas urbanos**

Crooks, A., C. Castle & M. Batty (2008) Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, 417-430.

Ligmann-Zielinska, A. & P. Jankowski (2007) Agent-based models as laboratories for spatially explicit planning policies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34, 316-335.

Zellner, M. L. (2008) Embracing Complexity and Uncertainty: The Potential of Agent-Based Modeling for Environmental Planning and Policy. *Planning Theory & Practice*, 9, 437-457.

- **Difusión de tecnologías, economía agrícola y ecologica**

Heckbert, S., T. Baynes & A. Reeson (2010) Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185, 39-53.

Nolan, J., D. Parker, G. C. van Kooten & T. Berger (2009) An Overview of Computational Modeling in Agricultural and Resource Economics. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 57, 417-429.

Schwarz, N. & A. Ernst (2009) Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations -- An empirical approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 497-511.

- **Documentación de MBA, desarrollo de software**

Grimm, V., U. Berger, D. L. DeAngelis, J. G. Polhill, J. Giske & S. F. Railsback (2010) The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221, 2760-2768.

Polhill, J. G., D. Parker, D. Brown & V. Grimm (2008) Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11.

Nikolai, C. & G. Madey (2009) Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12, 2.



- **Otras disciplinas: sociología, geografía, biología**

Macy, M. W. & R. Willer (2002) From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling. *Annual Review of Sociology*, 28, 143-166.

Tang, W. & D. A. Bennett (2010) Agent-based modeling of animal movement: a review. *Geography Compass*, 4, 682-700.

Torrens, P. (2010) Geography and computational social science. *GeoJournal*, 75, 133-148.

- **Modelos de uso de la tierra “Top-down”**

Verburg, P. & K. Overmars (2009) Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 24, 1167-1181.

- **Sistemas complejos naturales y humanos**

Liu, J., T. Dietz, S. R. Carpenter, M. Alberti, C. Folke, E. Moran, A. N. Pell, P. Deadman, T. Kratz, J. Lubchenco, E. Ostrom, Z. Ouyang, W. Provencher, C. L. R. S. H. Schneider & W. W. Taylor (2007) Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317, 1513-1516.

- **Ejemplos para las regiones del IAI**

Berger, T. (2001) Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25, 245-260.

Mena, C. F., S. J. Walsh, B. G. Frizzelle, Y. Xiaozheng & G. P. Malanson (2011) Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent-based model. *Applied Geography*, 31, 210-222.

- **Recursos on-line**

Netlogo: ccl.northwestern.edu/netlogo

Open ABM: www.openabm.org