

El rol de la materialidad en la distinción entre simulaciones computacionales y experimentos

José Víctor Ahumada*

Las simulaciones computacionales han invadido casi todas las disciplinas, ciencias naturales y sociales, ingeniería, matemáticas y arte, entre otras. Esto ha generado un interesante debate acerca de su estatus epistémico y ontológico, que ha atraído la atención de numerosos filósofos y científicos. Recientemente, una cantidad muy importante de trabajos filosóficos se han centrado en las semejanzas y diferencias de las simulaciones computacionales y experimentos materiales. Para muchos, como Simon (1969) y Guala (2002) por ejemplo, las simulaciones son simplemente experimentos sobre modelos matemáticos y no implican ninguna forma de materialidad, mientras que para otros como Parker (2010), Morrison (2009) y Morgan (2003, 2005), algunas simulaciones computacionales poseen alguna forma de materialidad equivalente a la que encontramos en los experimentos materiales. Además de esta semejanza o diferencia ontológica, está el problema epistémico de la confiabilidad que puede lograrse mediante esta nueva metodología. Este es un aspecto a tener en cuenta porque muchas veces se encuentra vinculado con las consideraciones ontológicas sobre la simulación o en su novedad como método. En líneas generales podemos decir que hay consenso en cuanto a que la simulación computacional ha cambiado las prácticas científicas y que no parece haber diferencias desde ese punto de vista, entre prácticas experimentales y las prácticas de las simulaciones computacionales. Un factor que puede explicar esta tendencia es que al igual que los experimentos, las simulaciones computacionales permiten realizar intervenciones o manipulaciones sobre un instrumento material como lo es la computadora digital aunque tales intervenciones deban en última instancia ser caracterizadas como modelos matemáticos. Pero no hay acuerdo en la literatura filosófica ni en la científica si las simulaciones son desde el punto de vista epistémico iguales a los experimentos reales o si las simulaciones son intervenciones sobre algo material o quasi material. Es por esta razón que la materialidad juega un rol clave en esta discusión. El hecho que en algunas disciplinas las simulaciones puedan ser más confiables o realizar mejores predicciones que un experimento material hace aún más complicada esta distinción entre experimentos y simulación. Pero como veremos a continuación, hay diferentes tipos de simulaciones computacionales y diferentes tipos de experimentos, cuestión que hay que tener en cuenta al momento de marcar semejanzas y diferencias. Empezaremos presentando un panorama crítico de los principales puntos de vistas.

* Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: jose@ffyh.unc.edu.ar

1 LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL COMO INTERVENCIÓN NO MATERIAL

De acuerdo a este punto de vista, las simulaciones computacionales son cualitativamente diferentes a los experimentos materiales, no tienen con el objeto simulado una semejanza en sus relaciones causales sino una mera semejanza formal. En la literatura se asocia esta posición a Simon-Guala. Guala considera además que plantear una diferencia ontológica entre simulación y experimento no conlleva a una postura blanco o negro, como Simon parece sostener respecto al carácter experimental-material de la simulación. Adhiere a la posibilidad de existencia de entidades intermedias entre simulaciones puras y experimentos materiales. Siguiendo a Morgan afirma que, puede haber casos híbridos donde algo de la materialidad es transferida a la simulación o donde se complementan sistemas reales con virtuales. Guala (2002) desarrolla solamente esta última alternativa. Estimamos que para relacionar los puntos de vistas ontológicos-epistémicos de la simulación, son más importantes los casos híbridos planteado por Morgan. Si hay gradualidad en cuanto a la materialidad, ¿no es posible acercarse cada vez más a los experimentos materiales y junto con la mayor posibilidad de manipulabilidad que brinda esta nueva metodología, colocarla a la par del primero?

Morrison (2009) le coloca un límite a esta posibilidad, la prueba de existencia de una entidad no se puede obtener con una simulación computacional. Una vez que vía experimento tenemos evidencias que ciertas entidades existen, es posible simular las mismas y lograr en algunos casos resultados más confiable que por la vía experimental. Por ejemplo, necesitamos experimentos para determinar la existencia de neuronas pero para determinar ciertos tipos de conexiones complejas entre las mismas, necesitamos por ahora simularlas con redes neuronales.

En una lectura superficial del trabajo de Guala, pareciera que sostiene un punto de vista tradicional sobre la relación simulación-experimento, donde la simulación está más del lado de la teoría que de los experimentos. Pero hacia final del trabajo queda muy claro que Guala defiende, con la existencia casos híbridos, un punto de vista muy diferente, tanto experimentos como simulaciones están entre teoría y el mundo y son mediadores en sentido de Morgan. Su ventaja epistémica dependerá de objeto tratado y del conocimiento disponible sobre el mismo. A esto puede agregarse la mayor capacidad de manipulabilidad o intervención. En la simulación como en los experimentos tradicionales, hay un balance entre representación y manipulabilidad que debe tenerse en cuenta. En algunos casos preferimos un modelo u objeto que sea menos representativo del objeto bajo investigación pero que sea más manipulable, si con esto último ganamos mayor conocimiento respecto a la estructura del objeto, que permite obtener una mejor compresión o podemos hacer mejores predicciones.

2 EXPERIMENTOS TRADICIONALES, EXPERIMENTOS VIRTUALES Y VIRTUALMENTE EXPERIMENTOS

En Morgan (2003) encontramos investigaciones muy sugerentes respecto a diferentes modos de simular fracturas de huesos. Keaveny et al. (1994) diseñaron dos experimentos para determinar la relación entre estructura de huesos y fractura.

En un primer experimento se cortó el hueso en rebanadas de modo que permitiera visualizar su complicada estructura interna haciendo que sobresalgan claramente los espacios que no son huesos (huecos). Posteriormente se hizo una imagen digital fotográfica de estos cortes de hueso. Las imágenes digitales son reensambladas en la computadora ofreciendo una imagen de alta calidad en 3-D de un hueso de una cadera real.

En el segundo tipo de experimento, el equipo creó una imagen computarizada en 3-D de un hueso estilizado, donde la estructura es de algún modo simplificada.

Para Morgan (Morgan 2003, p. 221-2) la primera simulación de huesos puede considerarse virtualmente un experimento. Puede sorprender como cualquier experimento sobre modelos pero puede también confundir, podría: “[...] contener cosas en la estructura acerca de las cuales el científico no ‘conoce’” (Morgan, 2003, p. 224). En un trabajo posterior (Morgan, 2005, p. 323-24), vincula la “confusión” a que el experimento puede estar diseñado con un grado de libertad de sus componentes que permita la posibilidad de no ser explicado dentro del dominio dado de la teoría.

Podemos decir entonces, en relación al primer experimento, que si los datos que se ingresan (*input*) tienen casi todas las restricciones que tiene el objeto real, es probable que esas simulaciones produzcan resultados que confundan al investigador dado que podría no salir como era lo esperado y esa falla no ser fácilmente entendible desde la estructura de los datos de entrada como lo es el caso del primer experimento.

La posibilidad que los “virtualmente experimentos” puedan confundir y como tal acercarse gradualmente al experimento es algo que en la literatura filosófica sobre simulación no se ha tratado, quedando la impresión que Morgan sostiene una diferencia tajante entre experimento y simulación. Es extraño porque reconocen que su preocupación central es el grado de materialidad de las simulaciones.

En la segunda simulación se da lo que denomina experimento virtual; en este caso el científico podría quedar sorprendido pero nunca confundido. Para Morgan los objetos tratados en los virtualmente experimentos son objetos semi-materiales, es decir, se produce alguna transferencia de materialidad del objeto real al objeto simulado. Si esto es así, podríamos construir simulaciones de mayor materialidad al punto de casi igualarla a experimentos reales.

Petersen (2006, p. 28) critica el estatus especial que Morgan le da a estos experimentos dado que para él una simulación digital aunque genere una visualización del objeto no es más que una simulación con salidas numéricas, ambas dependen del algoritmo y representación matemática de los datos subyacente. En otras palabras, las visualizaciones no aportan nada a la validez de la simulación.

En una primera aproximación, parece obvia la crítica de Petersen pero, si tomamos el proceso completo de simulación con las intervenciones que realiza un agente vemos que en muchas simulaciones se incluyen normalmente visualizaciones y que los patrones generados permiten modificar la misma o detectar otra información por medio de métodos cualitativos. Además, muchas simulaciones son más que los principios teóricos que están subsumidos en sus algoritmos, muchas veces se les agregan otras suposiciones que no provienen de la teoría y se usa cualquier recurso para mejorar la imitación. En algunos casos se hace estos agregados apelando a la intuición física pero en otros, simplemente apelando al ensayo y error (Winsberg, 2009).

Tal vez esos agregados sean la parte que permite acercar más la simulación al experimento real en cuanto a que puede aparecer información que no conocía el investigador o que no estaba en los comienzo de la simulación. En el caso de los experimentos sobre fractura de huesos de Keaveny es de destacar, que los virtualmente experimentos permiten ciertas observaciones que no son posibles por otra vía.

De este modo, podría responderse a las objeciones de Petersen al estatus experimental de los virtualmente experimentos y seguir sosteniendo que estas simulaciones al basarse en objetos semi-materiales pueden diferenciarse de los experimentos sobre modelos matemáticos y acercarse gradualmente a los experimentos de laboratorio.

3 LAS SIMULACIONES COMPUTACIONALES SON MATERIALES

Humphreys (2004) y Parker (2009) sostienen que dado que las simulaciones se ejecutan en una computadora material como la computadora digital, son materiales. Para ambos autores la materialidad de las simulaciones está vinculada a la pregunta de qué puede considerarse un nuevo tipo de instrumento. Un nuevo instrumento que aumenta de nuestras capacidades de calcular y observar. En un trabajo reciente Parker (2010) desarrolla más esta tesis. Las considera mecanismos que pueden encarnar distintos tipos de instrumentos, en eso radica su novedad o su problemática a la hora de evaluarlas. Así, una computadora no solo es un instrumento para computar (Humphreys), sino también para explorar modelos, desarrollar explicaciones, predecir, diseñar e interpretar experimentos y medir (Parker, 2010).

Pero para ser más precisos, debemos señalar que para Parker las simulaciones computacionales no son materiales, lo son los estudios de simulación computacional. “Los estudios de simulación computacional son materiales en un sentido directo” (Parker, 2009, p. 483). Los estudios de simulación computacional (*computer simulation study*) consisten en la actividad de configurar el estado inicial de la computadora digital desde donde se empezará ejecutar la simulación, comenzar el proceso iniciando el programa y recolectar la información que surgen de la manipulación de las variables, sus efectos y manifestaciones gráficas en el monitor.

Parker considera que la distinción propuesta por Guala no es correcta porque está basada en una concepción muy restringida de lo que es un experimento y de lo que es una simulación. Fundamenta que es una concepción muy restringida de experimento sosteniendo que cuando se experimenta con ratas para probar drogas de posterior uso humano, no se tienen las mismas causas en el experimento y en objeto investigado. En otras palabras, el objeto del experimento es diferente en mayor o menor medida al objeto que se está efectivamente investigando. Respecto a la simulación, Parker usa ejemplos de simulación analógica para mostrar que en una simulación pueden estar obrando las mismas causas. Esta última crítica es incorrecta dado que la distinción que Guala sostiene, no es entre simulaciones computacionales analógicas y experimentos sino entre simulaciones digitales y experimentos.

Veamos como Parker define experimento y simulación de modo que la materialidad no sea un rasgo importante: “[...] una simulación es una secuencia ordenada temporalmente que sirve de representación a otra secuencia ordenada temporalmente de estados” (Parker, 2009, p. 486). “Un experimento es toda actividad investigativa que involucra intervenir sobre un sistema en orden a ver cómo las propiedades de interés del sistema cambia a la luz de las intervenciones” (Parker, 2009, p. 487).

Las simulaciones no son experimentos porque son secuencias de estados y no involucran intervención por parte de agentes. Así definido un estudio de simulación computacional califica como experimento, dado que es una intervención sobre un sistema material como es la computadora digital. “El sistema experimental en una simulación computacional es la computadora digital programada, un sistema físico compuesto de cables, plástico, etc.” (Parker, 2009, p. 488-489).

Parker propone como defensa de la materialidad de los estudios de simulación computacional que nos imaginemos qué pasaría si fueran intervenciones sobre modelos abstractos. Primero, los que sostienen tal punto de vista, deberían explicar cómo es posible intervenir sobre sistemas abstractos y explicar cómo el sistema se mueve a través de una serie de estados durante el desarrollo de la simulación computacional. Segundo, suponiendo que esto puede lograrse, dado que los experimentos también son intervenciones sobre sistemas abstractos, deberían considerarse como experimentos no materiales, debido a que realizan sistemas abstractos. En tercer lugar, y más importante, dado que las simulaciones nunca son soluciones exactas de modelos matemáticos, no deberían ser consideradas como intervenciones sobre modelos matemáticos.

Las simulaciones climáticas son un buen ejemplo de estudios de simulación computacional, dado que son evaluadas y mejoradas confrontándolas repetidamente contra observaciones meteorológicas, con relativamente poca preocupación acerca de las propiedades de los sistemas matemáticos involucrados. Considera además, que otra razón para remarcar el carácter experimental de las simulaciones es que en las investigaciones climáticas los científicos tratan a las simulaciones como materiales. Por estas razones, Parker considera que una completa o correcta epistemología de la simulación computacional debe reflejar la materialidad de la computadora digital y las intervenciones sobre la misma en los estudios de simulación computacional.

Se podría estar de acuerdo con eso, no obstante seguir sosteniendo que la materialidad del experimento refleja algo que no posee la simulación computacional. En otras palabras, podríamos considerar que es correcto sostener que una buena epistemología de la simulación computacional debe tener en cuenta la materialidad de la computadora digital y la intervención que se hace sobre la misma, pero sostener que esto es compatible con la posición de Guala, la materialidad de la computadora digital no posee las propiedades causales del sistema investigado y esto hace una diferencia que debe ser reflejada en una comparación o definición.

4 SIMULACIÓN COMO CALIBRACIÓN

Otro modo de analizar la comparación entre experimentos y simulación es a través de la calibración. Un defensor explícito de este punto de vista es Eran Tal (2008). Sostiene que una adecuada comparación entre experimentos y simulación debe realizarse entre experimentos bien calibrados y simulaciones bien calibradas. Lo interesante de este planteo es que podría no haber diferencias epistémicas entre estas dos prácticas o métodos, si se asume que ambas son calibraciones. Eran Tal acuerda con Parker y Winsberg, contra de Morgan, al sostener que las diferencias ontológicas entre experimento y simulación computacional hacen una diferencia epistémica. Pero sostiene que las premisas que sostienen las posturas de estos autores no tienen en cuenta el rol de la calibración en la justificación de las inferencias evidenciales. Nos dice que aún la calibración de instrumentos de medidas muy simples, tal como el termómetro de mercurio, son producto de modelización y experimentación. Lo que Eran Tal no presenta es en qué medida esa calibración es o no dependiente de la materialidad de la computadora digital. No aclara si modeliza el experimento o materializa la simulación. Estimamos que es lo primero dado que no hay ninguna referencia a los componentes de una simulación y sus argumentos pasan por el rol de los modelos en los experimentos.

Veamos la propuesta de Morrison que va también en esta dirección que plantea Eran Tal.

5 MATERIALIDAD EN EL MODELO DE SIMULACIÓN (Y NO EN LA COMPUTADORA)

Para Morrison (2009) los modelos actúan como mecanismos de medición y este rol es crucial para definir su carácter experimental. Los experimentos materiales también requieren de modelos y en muchos casos no se apela a la materialidad como fuente de justificación sino al modelo de aquella materialidad que de mejor cuenta de los datos.

Mi punto aquí no es negar el rol a la materialidad para hacer afirmaciones ontológicas sino solo señalar que en contextos experimentales complejos la materialidad no es un estándar inequívoco que funciona como el modo de distinguir epistémicamente salidas de simulación de resultados experimentales. (Morrison, 2009, p. 122-3).

Giere no está de acuerdo con la idea que las simulaciones constituyen mediciones. Una simulación computacional no tiene interacción causal con el sistema investigado. Una medición mediante simulación es una simulación de una medición y no una medición. La medición mediante simulación no cuenta como medición y por esta vía no puede igualarse epistemológicamente a ambas metodologías como pretende Morrison. Aunque la simulación ofrezca conocimiento confiable acerca del sistema investigado, no hay interacción y eso hace que no se pueda ganar información acerca del sistema investigado. Para Giere aunque se necesiten modelos para medir la constante gravitacional local en la superficie de la tierra, esto no apoya la conclusión de Morrison de que los modelos miden, lo que mide es el péndulo físico que está en interacción causal con el campo gravitacional de la tierra.

La importancia de esta crítica es que vuelve a plantear el problema de la materialidad vía la conexión causal entre instrumento y sistema investigado. Esto le otorga ciertas ventajas o desventajas al experimento tradicional en el sentido de que hace apuesta sobre lo investigado con posibilidades de ganar o perder en cuanto a que puede aparecer algo que no estaban en los supuestos iniciales. Eso no ocurriría con la simulación que está limitada a los supuestos de los modelos usados para construirla.

Morrison considera que en las simulaciones computacionales están presentes las interacciones causales entre el aparato y lo medido vía modelos de esas interacciones. Esto parecería en principio darle la razón a Giere de que una medición de una simulación es una medición simulada.

El predominio de las computadoras digitales y nuestra familiaridad con ellas hacen que olvidemos que hubo computadoras analógicas. Pero, ¿no podría ocurrir que la diferencia entre experimento y simulación pueda estar vinculada a la diferencia que hay entre estos dos tipos de computadora? Y en consecuencia, ¿no hay diferencias en cuanto a la materialidad entre computadoras analógicas y digitales?, ¿no es esta misma diferencia lo que separa a las simulaciones digitales del experimento material?

No hay muchos trabajos interesantes sobre la distinción entre simulaciones analógicas y digitales o entre computadoras analógicas y digitales. Unos de los pocos es “Analog Simulation” (Trenholme, 1994). En dicho trabajo se sostiene que en la computación simbólica el isomorfismo crucial se da entre el funcionamiento causal del mecanismo y las estructuras lógicas abstractas de la teoría simbólica, esta relación existe independientemente de cualquier aplicación de la teoría al fenómeno natural. Distinto es el caso de la simulación analógica, que se define como un simple mapeo a partir de las relaciones causales entre elementos de la simulación y las relaciones causales entre elementos del fenómeno simulado. Un referee del trabajo de Thrensholme objetó que pueda hacerse una diferencia de este tipo entre simulaciones analógicas y digitales:

Supongamos que una simulación analógica es electrónica (simulando, quizás, algún sistema armónico complejo). Imaginemos ahora que se puede construir una simulación simbólica separada de cada uno de estos componentes, adosándole a ellos un apropiado conversor analógico digital y digital analógico, y luego conectando la resultante “caja negra” a la topología del circuito del simulador electrónico. No veo como negar que tenemos un “isomorfismo de estructuras causales”. (Trensholm, 1994, p. 121).

¿Las simulaciones computacionales digitales con salidas visuales son el tipo de simulación propuesto por el referee? Entiendo que la respuesta de Giere sería que no, salvo que tuviéramos un traductor analógico-digital en conexión continua con el fenómeno bajo estudio. Sin esto el sistema no sería el mismo y es de lo que podría valerse Giere para derribar la materialidad de las simulaciones computacionales digitales, aunque simulen las relaciones causales que interaccionan con lo medido. Una de las consecuencias de esta crítica sería que las simulaciones no van más allá de los algoritmos y datos codificados, aunque en

algunos contextos puedan aportar información que no nos ofrecen los experimentos tradicionales como ocurre en las simulaciones climáticas.

Es importante tener en cuenta que estas críticas parecen más bien apuntar hacia el contexto de justificación de las simulaciones, una simulación debería ofrecer las mismas garantías que un experimento en este contexto y no cuentan las posibilidades mayores o menores que brindaría en el contexto de descubrimiento. En este sentido, las mediciones mediante simulación serían provisionales, dependerían de que posteriormente puedan justificarse mediante algún experimento tradicional si es que esto es posible. En caso de no serlo es donde uno puede preguntarse: ¿qué puede suceder con esas prácticas?, ¿no tendrían un rol justificatorio?

Podemos recapitular lo expuesto hasta aquí volviendo a la pregunta: ¿la materialidad importa a la hora de diferenciar experimentos de simulaciones computacionales? A modo de síntesis podríamos responder:

- a) Sí, es necesaria para que un experimento nos indique la existencia y primeros datos de un fenómeno (Morrison, 2009).
- b) Sí, porque la interacción causal es necesaria para la medición (Giere, 2009).
- c) Sí, porque las simulaciones que son virtualmente experimentos son intervenciones sobre objetos semi-materiales que en algunos contextos pueden poseer las características del experimento material de confundir y sorprender (Morgan, 2003).

Winsberg (2009) hizo ese intento de dejar de lado la materialidad en la definición de simulación. Adujo que las simulaciones analógicas son también materiales y que si queremos una definición que incluya tanto simulaciones analógicas como digitales, debemos abandonar la materialidad como el aspecto que hace la diferencia crucial. Para Winsberg, lo que distingue a la simulación del experimento es el carácter del argumento dado para legitimar las inferencias. En una simulación se está preocupado por la validez externa mientras que en un experimento se está preocupado por la validez interna.

Es una salida interesante que de algún modo disuelve las posiciones presentadas anteriormente pero se le puede hacer por lo menos dos objeciones. En primer lugar, supone una noción muy restringida de simulación y experimento. En algunos experimentos hay preocupación por la validez externa y en algunas simulaciones por la validez interna.

Además, como bien lo señaló Morrison, esto deja a la distinción entre experimento y simulación en un plano meramente metodológico insuficiente para entender la intuición que la mayoría tiene de que hay diferencias o semejanzas en el plano epistémico y ontológico, y que las simulaciones computacionales constituyen un nuevo modo de hacer ciencia.

CONCLUSIÓN

Hemos tratado de dar un panorama de las discusiones acerca del rol de la materialidad en la distinción simulación computacional-experimento. La mayoría parte de críticas o alternativas a la distinción que hacen Simon-Guala. Vimos también que en (Guala, 2002) hay diferencias con la concepción original de Simon, la distinción entre simulaciones computacionales y experimento no es blanco o negro, hay simulaciones que son intervenciones sobre modelos abstractos pero hay otras que son sobre objetos semi-materiales o constituyen cuasi-experimentos. Es ahí donde deberíamos investigar conceptualmente la materialidad de las simulaciones y su relación con los experimentos tradicionales. En muchas disciplinas, el no trabajar con la misma materia no es un obstáculo insalvable si se puede intervenir mejor virtualmen-

te. Como bien lo señaló Fox Keller (2000), muchas veces preferimos modelos que posean menor capacidad representacional pero sean más manipulables. El problema al evaluar el grado de materialidad de las simulaciones y que no parece ser advertido por críticos como Petersen (2006) es que, el contenido empírico de una simulación puede estar tanto en los algoritmos (como en el caso de autómatas celulares o algoritmos evolutivos) o en los resultados (iconicidad de la visualizaciones en el monitor) o en una combinación de ambos.

Por último, la materialidad importa porque las simulaciones pueden ser semi-materiales y ser también más manipulables que sistemas con las mismas relaciones causales que los investigados. Es en ese nivel donde podemos justificar que son materiales y no exclusivamente por la materialidad de la computadora digital como propone Parker.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GIERE, Ronald. Is computer simulation changing the face of experimentation? *Philosophical Studies* **143** (1): 59-62, 2009.
- GUALA, F. Models, simulations, and experiments. *Model-based reasoning: Science, technology, values*: 59-74, 2002.
- HUMPHREYS, Paul. *Extending ourselves: computational science, empiricism, and scientific method*. New York: Oxford University Press, 2004.
- KEAVENY, Tony M.; WACHTEL, Edward F.; GUO, X. Edward & HAYES, Wilson C. Mechanical behavior of damaged trabecular bone. *Journal of Biomechanics* **27** (11): 1309-1318, 1994.
- KELLER, E. F. Models of and models for: Theory and practice in contemporary biology. *Philosophy of Science*: 72-86, 2000.
- MORGAN, Mary S. Experiments without material intervention: model experiments, virtual experiments and virtually experiments. Pp. 216-235, en: RADDER, Hans (ed.). *The philosophy of scientific experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003.
- MORRISON, Margaret. Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation. *Philosophical Studies* **143** (1): 33-57, 2009.
- PARKER, Wendy. Does matter really matter? Computer simulations, experiments, and materiality. *Synthese* **169** (3): 483-496, 2009.
- _____. An instrument for what? Digital computers, simulation and scientific practice. *Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science* **4**(1), 2010.
- PETERSEN, Arthur C. *Simulating nature: a philosophical study of computer-simulation uncertainties and their role in climate science and policy advice*. Het Spinhuis, 2006.
- SIMON, H. A. *The science of the artificial*. MIT Press, 1969.
- TAL, E. *Computer simulations as evidential tools: calibration and epistemic power*, 2008.
- TRENHOLME, Russell. Analog simulation. *Philosophy of Science* **61** (1): 115-131, 1994.
- WINSBERG, Eric. A tale of two methods. *Synthese* **169** (3): 575-592, 2009.