

Interdependencias del Sistema de Transporte Colectivo Metro y la Red de Transporte de Pasajeros con autómatas celulares

Diego Alfredo Padilla Pérez^{1,2}, Jaime Reynaldo Santos Reyes^{1,2},
Luis Manuel Hernández Simón¹, José Luis González Domínguez¹,
Tatiana Gouseva^{1,2}, Galdino Cardenal Santos Reyes^{1,2}, Verónica Mendoza González¹

¹Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.

²Grupo de Investigación SARACS (Safety, Accident, Risk & Reliability Analysis)

dapswy27_ipn@hotmail.com

Resumen. Las relaciones de las infraestructuras del Sistema de Transporte Colectivo Metro con la Red de Transporte de Pasajeros, en la Ciudad de México, se llaman interdependencias. Estas relaciones son bidireccionales, es decir, el estado de cada infraestructura se correlaciona con el estado de la otra infraestructura y viceversa. En este trabajo modelamos las interacciones e interdependencias Metro con la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) cuando el primero no está disponible. El modelado de las interdependencias se realizó con la simulación de autómatas celulares en Matlab. Las interdependencias entre estos dos sistemas se representan de la siguiente manera: interdependencias fuertes están representadas en color rojo, una interdependencia débil en color anaranjado y si no hay interdependencias se utiliza el color negro. Con este modelo se puede representar diferentes escenarios entre la falta de disponibilidad del Metro y la canalización de los pasajeros hacia la Red de Trasporte.

Palabras clave: Interdependencias, Infraestructuras, Metro, Autómatas Celulares.

1. Introducción

Las infraestructuras se encuentran conectadas en múltiples puntos, de tal manera que existe una relación bidireccional entre los estados de dos infraestructuras determinadas. En otras palabras, sea la infraestructura 1 la cual depende de la infraestructura 2 a través de la relación i y viceversa, la infraestructura 2 que depende de la infraestructura 1 a través de la relación j ; adicionalmente, ambas infraestructuras depende de la relación i,j .

Los Tipos de Interdependencias tienen características distintas, estas clases de interdependencias no son y no deben de ser mutuamente excluyentes. Los tipos de interdependencias son: física, cibernetica, geográfica y lógica [1].

Interdependencia física se tiene cuando el estado de una infraestructura depende de la producción de material de la otra infraestructura. Esto se genera entre la vinculación de entradas y salidas.

Interdependencia cibernetica se genera en el momento en que una infraestructura requiere de información en enlaces electrónicos de otra infraestructura.

Interdependencia geográfica se produce en el momento en que dos o más infraestructuras se encuentran en estrecha proximidad espacial.

Dos infraestructuras son lógicamente interdependientes si el estado de cada una depende del estado de la otra a través de la validez de los argumentos en términos de su estructura.

Una cosmovisión de las interdependencias ha demostrado los peligros inherentes que se encuentran en las propiedades emergentes. Por tal motivo, la Comisión Presidencial de los EE. UU., señaló que "no hay prioridad más urgente que garantizar la seguridad, continuidad y disponibilidad de las infraestructuras críticas" [2]

El informe de la Comisión Presidencial de EE.UU., sobre protección de infraestructuras críticas articuló los peligros inherentes de las interdependencias no controladas, pero no proporcionó una metodología para pensar o analizar este fenómeno [3].

Los autómatas celulares (CA) son algunos de los modelos más antiguos de la computación natural, que data de más de medio siglo. Los primeros estudios de CA por John von Neumann en la década de 1940 fueron biológicamente motivados [4][5]; el objetivo era diseñar sistemas artificiales autor-replicantes que también son computacionalmente universales. Von Neumann define un universo discreto que consta de una malla bidimensional de máquinas de estados finitos, llamadas células, interconectadas entre sí a nivel local. Las células cambian de forma sincrónica estados en función de los estados de algunas células cercanas, los vecinos, según lo determinado por una regla de actualización local.

Todas las células utilizan la misma regla de actualización para que el sistema es homogéneo al igual que muchos sistemas físicos y biológicos. Estos universos celulares son conocidos como Autómata Celular [6].

Los estados del autómata provienen de un estado conjunto finito S . En un momento dado, la configuración del autómata es una aplicación $c: \mathbb{Z}^d \rightarrow S$ que especifica los estados de todas las células. El conjunto $S^{\mathbb{Z}^d}$ de todas las configuraciones se denota por $C(d, S)$, o brevemente C cuando d y S son conocidos a partir del contexto [7].

Las CA, son infinitos conjuntos de máquinas de estados finitos llamadas células e indexado por \mathbb{Z} . Estas células evolucionan sincrónicamente en pasos de tiempo discretos siguiendo una regla local por el cual se determina el estado de una célula en función de su propio estado, junto con los estados de sus dos vecinos [8].

2. Modelado de las Interdependencias

El modelado de las interdependencias está constituido por el método sistemático del proceso cibernetico participativo de investigación-acción y los pasos de diagnóstico, diseño y acción. El diagnóstico tiene la información de los eventos externos que pueden afectar a la infraestructura y cómo la afectan. Esta información define las entidades involucradas.

El diseño está compuesto por cinco etapas que son: entidades involucradas, dirección de la relación, tipos de Interdependencia, estado de relación y riesgo.

La naturaleza de las entidades involucradas generan las dependencias de instancias de personas-personas, personas-material, personas-instalaciones y material – instalaciones. La dirección de la relación entre las entidades involucradas y el tipo de interdependencia pueden ser unidireccionales o bidireccionales.

La compartición entre las entidades involucradas definen los tipos de interdependencia que son: Física (un elemento producido por uno depende del consumido del otro elemento), Cibernetica (flujo de información electrónica), geográfica (se produce en el momento en que dos o más elementos se encuentran en estrecha proximidad espacial), lógica (el estado del elemento depende a través de la validez de otro elemento).

La etapa del estado de relación son los eventos que afectan a las entidades involucradas. Los estados de relación están expuestos a amenazas y tienen vulnerabilidades. Si las amenazas explotan las vulnerabilidades generan un riesgo que ocasiona un impacto.

Las interdependencias están determinadas con base en su impacto en la siguiente infraestructura. El impacto está determinado de la siguiente forma:

- Interdependencia Alta
- Interdependencia Media
- Interdependencia Baja

2.1 Interdependencias del Metro

Para analizar las interdependencias del Metro se correlacionará con los usuarios, trenes, instalaciones, conductores, mantenimiento y central de control [9] [10] [11]

En la tabla 1, tabla 2 y tabla 3 se muestra los tipos de entidades involucradas, tipo de interdependencia y los estados de relación del sistema de transporte colectivo Metro.

Tabla 1. Interdependencias del Metro (Usuarios)

<i>Entidades</i>	<i>Interdependencia</i>	<i>Estado</i>
Usuarios – Trenes	Lógica	1.- Horas pico y Eventos Masivos
		2.- Vendedores 3.-Actos vandálicos
Usuarios – Instalaciones	Geográfica	4.- Aglomeracion y Violencia
		5.- Basura
		6.-Escaleras Eléctricas

Tabla 2. Interdependencias del Metro (Infraestructura).

<i>Entidades</i>	<i>Interdependencia</i>	<i>Estado</i>
Trenes – Mantenimiento	Física	7.- Suministro de Energía Eléctrica
	Lógica	8.- Falta de Mantenimiento
Mantenimiento – Instalaciones	Geográfica	9.- Lluvia 10.- Sismos
	Lógica	11.- Terrorismo
Instalaciones – Central de Control	Cibernética	12.-Información de Reportes
Central de Control – RTP	Cibernética	13.Información de Reportes

Tabla 3. Interdependencias del Metro (Conductores).

<i>Entidades</i>	<i>Interdependencia</i>	<i>Estado</i>
Trenes – Instalaciones	Lógica	14.- Retrasos en los Trenes
	Geográfica	15.- Vías
Trenes – Conductores	Lógica	16.- Ausencias
		17.- Estado Inconveniente

2.2. Interdependencias de la Red de Transporte de Pasajeros

Para analizar las interdependencias de la Red de Transporte de Pasajeros se correlacionará con los usuarios, camiones RTP, conductores, mantenimiento y módulos. [12]. En la tabla 4 se tienen los tipos de entidades involucradas, tipo de interdependencia y los estados de relación de la Red de Transporte de Pasajeros.

Tabla 4. Interdependencias de la Red de Transporte de Pasajeros.

<i>Entidades</i>	<i>Interdependencia</i>	<i>Estado</i>
Usuarios – Camiones	Lógica	1.- Horas Pico, Eventos Masivos, Tráfico y Manifestaciones
		2.- Actos Vandálicos
Camiones – Conductores	Física	3.- Ausencias
		4.- Estado Inconveniente
Camiones – Mantenimiento	Lógica	5.- Falta de Mantenimiento
Camiones – Módulo Operativo	Lógica	6.- Ubicación de los Módulos
		7.- Cierre de los Módulos

3. Desarrollo

En 1984 Wolfram propuso una clasificación en la que se recogen aquellas situaciones o estados a los que un autómata celular puede evolucionar tras un cierto tiempo de simulación, número de iteraciones o ciclos [13]. Para realizar las interdependencias con el modelo de autómatas celular entre el Metro y la Red de Transporte de Pasajeros se realiza una matriz de transición entre cada entidad. La matriz de transición se obtiene del diagrama de estados de las entidades. En la figura 1 se muestra el diagrama de estados de las entidades involucradas (tabla 1, tabla 2 y tabla 3) en el Metro.

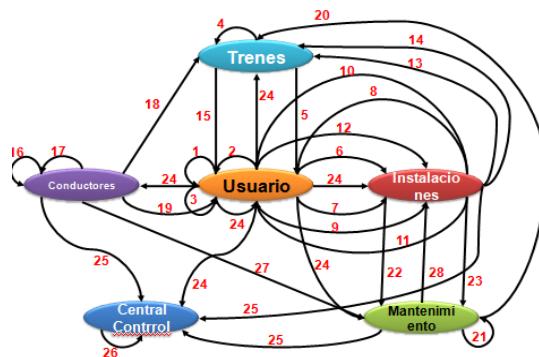


Figura 1. Diagrama de Estados de las Entidades en el Metro.

Con base en el diagrama de estados se realiza la matriz de transición. En la tabla 5 se observa la matriz de transición de cada estado de las entidades en el metro.

Tabla 5. Matriz de Transición del Metro.

	<i>Usuario</i>	<i>Trenes</i>	<i>Instalaciones</i>	<i>Conductores</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Central Control</i>
Usuario	$12x_1$	$2x_2$	$3x_3$	x_4	0	0
Trenes	x_1	$3x_2$	$2x_3$	x_4	x_5	0
Instalaciones	$5x_1$	0	$8x_3$	0	x_5	0
Conductores	x_1	0	0	$6x_4$	0	0
Mantenimiento	x_1	0	$2x_3$	x_4	$4x_5$	0
Central Control	x_1	0	x_3	x_4	x_5	x_6

En la figura 2 se tiene el diagrama de estados de las entidades involucradas (Tabla 4) en la Red de Transporte de Pasajeros.

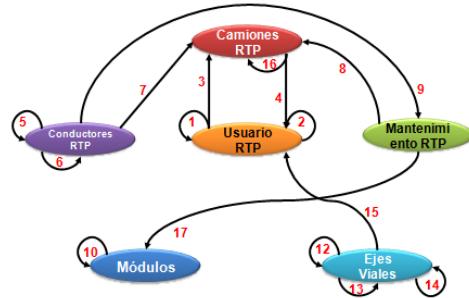


Figura 2. Diagrama de Estados de las Entidades en la RTP.

En la figura 2 se ha agregado una entidad más que es ejes viales, debido a que este sistema hace uso de esta entidad. Con base en el diagrama de estados se realiza la matriz de transición. En la tabla 6 se muestra la matriz de transición de cada estado de las entidades en la red de transporte de pasajeros.

Tabla 6. Matriz de Transición de la RTP.

	<i>Usuarios</i>	<i>Camiones</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Conductores</i>	<i>Módulos</i>	<i>Ejes Viales</i>
Usuarios	$3x_7$	x_8	0	0	0	0
Camiones	x_7	$2x_8$	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
Mantenimiento	0	0	$2x_9$	x_{10}	0	0
Conductores	0	0	0	$4x_{10}$	0	0
Módulos	0	0	x_9	0	$3x_{11}$	0
Ejes Viales	0	0	0	0	0	$4x_{12}$

Para generar las interdependencias entre Metro y la Red de Transporte de Pasajeros, se juntaran las dos matrices de transición en forma diagonal y la intersección entre cada entidad serán las interdependencias. En la figura 3 se observa la matriz de interdependencias.

	usuario	Trenes	Instalaciones	Conductores	Mantenimiento	Central Control	Usuarios	Camiones	Mantenimiento	Conductores	Módulos	Ejes Viales
Usuario	12x ₁	2x ₂	3x ₃	x ₄	0	0						
Trenes	x ₁	3x ₂	2x ₃	x ₄	x ₅	0						
Instalaciones	5x ₁	0	8x ₃	0	x ₅	0						
Conductores	x ₁	0	0	6x ₄	0	0						
Mantenimiento	x ₁	0	2x ₃	x ₄	4x ₅	0						
Central Control	x ₁	0	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆						
Usuarios							3x ₇	x ₈	0	0	0	0
Camiones							x ₇	2x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂
Mantenimiento							0	0	2x ₉	x ₁₀	0	0
Conductores							0	0	0	4x ₁₀	0	0
Módulos							0	0	x ₉	0	3x ₁₁	0
Ejes Viales							0	0	0	0	0	4x ₁₂

Figura 3. Matriz de Interdependencia del Metro y la RTP.

Cuando se crea la matriz de interdependencia del metro y la red de transporte de pasajeros se podrá generar una matriz de 12x12. En esta matriz se representará cada entidad que interviene en las interdependencias entre el metro y en la red de transporte de pasajeros. En la figura 4 se tiene la matriz de interdependencia 12x12. Cada celda de la matriz 12x12 tendrá una ponderación normalizada de acuerdo a la matriz de transición del metro y la red de transporte de pasajeros.

	usuario	Trenes	Instalaciones	Conductores	Mantenimiento	Central Control	Usuarios	Camiones	Mantenimiento	Conductores	Módulos	Ejes Viales
Usuario	1	0.2	0.25	0.08	0	0	x	x	x	x	x	x
Trenes	0.08	0.3	0.17	0.08	0.08	0	x	x	x	x	x	x
Instalaciones	0.4	0	0.67	0	0.08	0	x	x	x	x	x	x
Conductores	0.08	0	0	0.5	0	0	x	x	x	x	x	x
Mantenimiento	0.08	0	0.17	0.08	0.3	0	x	x	x	x	x	x
Central Control	0.08	0	0.08	0.08	0.08	0.08	x	x	x	x	x	x
Usuarios	x	x	x	x	x	x	0.3	0.1	0	0	0	0
Camiones	x	x	x	x	x	x	0.1	0.2	0.1	0.08	0.1	0.08
Mantenimiento	x	x	x	x	x	x	0	0	0.2	0.08	0	0
Conductores	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0.33	0	0
Módulos	x	x	x	x	x	x	0	0	0.1	0	0.3	0
Ejes Viales	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0	0	0.33

Figura 4. Matriz Normalizada de Interdependencia 12x12.

En la Figura 4 se ha normalizado la matriz de interdependencia 12x12, por lo tanto, se toma una celda $x(i, j)$ se le denominará célula central y sus vecinos que son las células $x(i, j - 1)$, $x(i, j + 1)$, $x(i - 1, j)$, $x(i + 1, j)$, $x(i + 1, j - 1)$, $x(i + 1, j + 1)$, $x(i - 1, j - 1)$ y $x(i - 1, j + 1)$.

Para realizar las interdependencias entre el metro y la red de transporte de pasajeros se genera una autómata celular. La autómata celular está sujeta a:

$$\sum x(\pm i, \pm j) < 3 \text{ no cambia el estado de la célula.}$$

$$\sum x(\pm i, \pm j) > 4 \text{ si cambia el estado a 1 de la célula.}$$

Considerando todas las restricciones de las autómatas celulares se analizará lo sucedido en la línea 2 del metro. La línea 2 del metro suspendió su servicio a las 7am con las siguientes restricciones. [9][10][11][12][14][15]

- 44825 usuarios a las 7am.
- 38 trenes en circulación.
- 38 conductores disponibles.
- La red de transporte de pasajeros está sujeta a:
- 731 camiones utilizados de 1458.
- Se propone el 90% de usuarios a las 7am.
- 731 conductores disponibles.

A continuación se proponen las siguientes condiciones para el metro y la red de transporte de pasajeros:

- Las instalaciones del metro estén al 75% de su capacidad.
- El personal de mantenimiento del metro estén al 50%.
- Central de Control al 75%.
- El personal de mantenimiento de los camiones estén al 50%.
- 80% de los camiones disponibles en los módulos.
- Los ejes viales estén al 80% de su capacidad.

El diseño de las autómatas celulares correspondientes a la matriz normalizada 12x12 y todas las restricciones se desarrollaron en el software de Matlab versión R2009a. Para realizar dicha simulación se utilizó una PC con las siguientes características:

- Un procesador de 2 núcleos.
- Velocidad del procesador 1.66Ghz
- Memoria Caché 512Kb
- Memoria RAM 2Gb

El lenguaje de Matlab ejecuta comandos o grupos de comandos a la vez sin compilar y genera un código de máquina JIT (del inglés: “Just-In-Time”) de la tecnología de compilación, lo que le permite recorrer con rapidez a la solución óptima. [16] En la figura 5 se tiene los estados iniciales de las autómatas celulares.

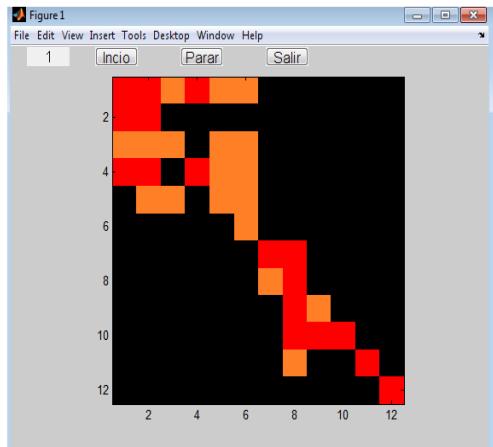


Figura 5. Estado Inicial de la Autómata Celular.

Con el estado inicial de las autómatas celulares se hacen las iteraciones con base a las restricciones antes mencionadas. En la figura 6 se observa el estado final de las autómatas celulares después de 1100 iteraciones.

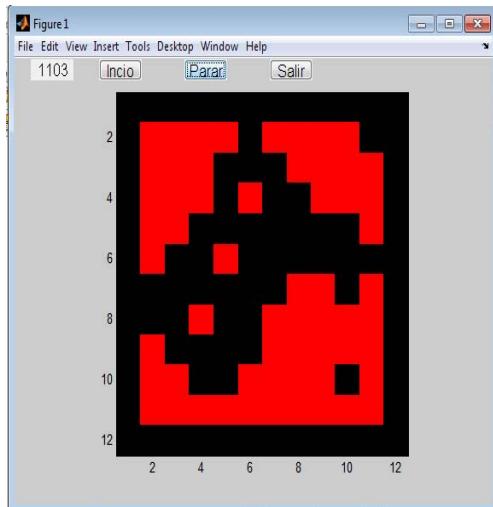


Figura 6. Estado Final de la Autómata Celular con 1100 iteraciones.

4. Resultados y conclusiones

Con base en la figura 6 se analizará las interdependencias del metro y la red de transporte de pasajeros. En la figura 7 posee una tabulación de la Figura 6 para poder observar las interdependencias.

	usuario	Trenes	Instalaciones	Conductores	Mantenimiento	Central Control	Usuarios	Camiones	Mantenimiento	Conductores	Módulos	Ejes viales
Usuario												
Trenes												
Instalaciones												
Conductores												
Mantenimiento												
Central Control												
Usuarios												
Camiones												
Mantenimiento												
Conductores												
Módulos												
Ejes Viales												

Figura 7. Tabulación de las Interdependencias.

Analizando la suspensión del servicio de la línea 2 del metro y con las restricciones que conllevan dicho evento, en la Figura 7 se observa las interdependencias que generaron por el cierre de la línea 2. A continuación se describe las interdependencias entre el metro y la red de transporte de pasajeros.

- Los usuarios del metro afectarán a los usuarios de la red de transporte de pasajeros.
- La cantidad de usuarios del metro demandará más conductores para los camiones de la red de transporte de pasajeros; y a su vez los módulos tendrán que alistar los camiones.
- Los usuarios del metro saldrán a los ejes viales a buscar un transporte para llegar a su destino.
- El mal funcionamiento de los trenes, instalaciones, conductores de trenes, mantenimiento y central de control provocará una aglomeración de usuarios y estos a su vez tendrán que buscar camiones u otro medio de transporte afectando los ejes viales.

- La falta de mantenimiento, una mala sincronización de los camiones, la ausencia o huelga de conductores y/o manifestaciones ciudadanas generará en la red de transporte de pasajeros una aglomeración de usuarios. Por lo tanto, buscarán una alternativa para trasladarse y esto ocasionará una aglomeración con los usuarios del metro y por ende una mayor demanda de trenes para trasladarlos.
- El tráfico, accidentes, construcciones, manifestaciones ciudadanas, etc. en los ejes viales provocará un incremento de usuarios en el metro.

Otro análisis de la suspensión del servicio del metro fue en la línea 1. La suspensión del servicio fue a las 5:50 am [17]. En las figuras 8 y 9 se observa la simulación de las interdependencias del metro y la RTP, respectivamente.



Figura 8. Estado Inicial de la Autómata Celular.

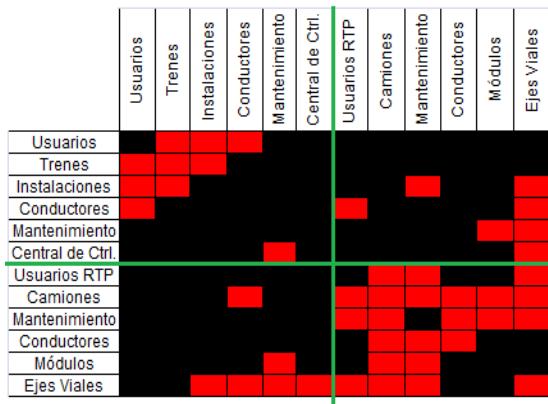


Figura 9. Tabulación de las Interdependencias.

A continuación se describe las interdependencias entre el metro y la red de transporte de pasajeros con base en la figura 9.

- Los usuarios del metro no afectarán a los usuarios de la red de transporte de pasajeros.
- La cantidad de usuarios no demandará más conductores para los camiones de la red de transporte de pasajeros, por lo tanto, los módulos no tendrán que alistar más camiones que los programados.
- Los usuarios del metro no afectarán a los ejes viales.
- Si continúa el mal funcionamiento de los trenes, instalaciones, conductores de trenes, mantenimiento y central de control provocará una aglomeración de usuarios y estos a su vez tendrán que buscar camiones u otro medio de transporte afectando los ejes viales en la próxima hora.
- La falta de mantenimiento, una mala sincronización de los camiones, la ausencia o huelga de conductores y tráfico o accidentes en los ejes viales generarán conflictos a la central de control, mantenimiento, conductores e instalaciones del metro por no poder transportar a los usuarios del metro.

Con la matriz de interdependencias y las autómatas celular se pueden modelar diferentes escenarios de interdependencias. Esto ayudará a analizar el impacto que tendrá si se colapsa una línea del metro. Las herramientas utilizadas para modelar las interdependencias como i2Sim, solo permiten observar los riegos de las infraestructuras. Con el arreglo de autómatas celulares proporciona los riegos y las interdependencias lógicas.

Referencias

1. President's Commission on Critical Infrastructure Protection. 1997, Critica foundations: Protecting America's Infrastructures, 22 febrero de 2011, <http://www.ciai.gov>
2. Decision, P. (2011). Presidential Decision Directive 63. Recuperado el 4 de enero de 2012, de <http://www.ciao.gov>.
3. Protection, P. C. (2001). Report on the Federal Agenda Critical Infrastructure Protection Reserch and Development.
4. A.W. Burks, Von Neumann's self-reproducing automata, in:A.W. Burks (Ed.), Essays on Cellular Automata, University of Illinois Press, Champaign, IL, 1970, pp. 3–64.
5. J. VonNeumann, in:A.W. Burks (Ed.), Theory of Self-Reproducing Automata, University of Illinois Press, Champign, IL, 1966.
6. E.F. Codd, Cellular Automata, Academic Press, New York, 1968.
7. Jarkko Kari, Theory of cellular automata: A survey, Theoretical Computer Science, Volume 334, Issues 1–3, 15 April 2005, Pages 3-33, ISSN 0304-3975

8. Jacques Mazoyer, Ivan Rapaport, Inducing an order on cellular automata by a grouping operation Original Research Article Discrete Applied Mathematics, Volume 91, Issues 1–3, 26 January 1999, Pages 177-196
9. INFOMEX, Solicitud de acceso a la información número: 0322000009212. Distrito Federal.
10. INFOMEX, Gerencia Jurídica número de folio: 0325000051512, Distrito Federal, Información Pública.
11. INFOMEX, Solicitud de acceso a la información número: 0325000049912. Distrito Federal, Información Pública.
12. INFOMEX Respuesta a la solicitud 03200000149 12. Distrito Federal.
13. Rafael Lahoz - Beltrá, Bioinformática Simulación, Vida Artificial e Inteligencia Artificial, Díaz de Santos, Madrid 2004.
14. INFOMEX, Solicitud 010900009612. Distrito Federal. Sub-secretaría de Control de Tránsito.
16. INFOMEX, Solicitud 010900107412. Distrito Federal. Sub-secretaría de Control de Tránsito.
17. Matlab, The language of technical Computing, 11 de Julio del 2012.
<http://www.mathworks.com/products/matlab/>
18. Fallas en el Metro. La Razón 2010. Recuperado el 25 de julio de 2013, de
<http://www.azon.com.mx:8008/spip.php?article125810>