

## 1 Resum del projecte

*"Caminante, no hay camino, se hace camino al andar"*

— Antonio Machado

En la pràctica de l'Arquitectura i de l'Urbanisme, han aparegut en les últimes dècades una creixent quantitat d'eines de simulació en àmbits com el de la representació, l'energia, el comportament estructural o el control i seguiment de l'obra. Moltes d'aquestes eines representen una evolució de metodologies existents mitjançant l'aplicació de la informàtica.

Aquesta capacitat de simulació de la realitat física contrasta amb la dificultat que presenta la simulació del comportament dels usuaris dins dels edificis o les ciutats, degut al poc coneixement de la seva conducta en aquests àmbits. Els usos que les persones faran dels espais són una nebulosa de nocions intuïtives dins del procés creatiu dels qui conceben aquests espais.

De la mateixa manera com un equip d'Arquitectes que està projectant un gratacels necessita saber el comportament dels materials, l'aspecte de l'edifici acabat o la planificació dels treballs, necessiten disposar d'eines per anticipar el comportament de les persones (treballadors, clients, vianants o habitants) dins els espais que projecten.

Aquesta tesi vol obtenir, mitjançant un model basant en agents, una eina per poder anticipar els moviments de les persones en els espais que projecten Arquitectes, Urbanistes i Paisatgistes i d'aquesta manera obtenir espais més adequats a les necessitats dels usuaris.

Per tal de definir aquest model del comportament dels vianants en l'espai públic, es parteix de l'observació de la presència en espais públics total o parcialment enjardinats d'unes zones mancades de vegetació on el ferm ha estat compactat per les petjades dels vianants, en forma de camins o de dreceres. Aquestes dreceres expliquen la lògica de formació de manera espontània per part dels usuaris d'aquests elements no planificats, coneguts en anglès com a *"desire paths"*, en contraposició als camins formalment planificats.

## 2 Delimitació de l'àmbit d'estudi

*"Everything should be made as simple as possible, but no simpler"*

— Albert Einstein (premi Nobel de Física de 1921)

Per delimitar l'àmbit d'estudi és necessari acotar quin tipus de comportament de les persones es vol modelar i les característiques dels espais a estudiar.

### 2.1 Comportament de les persones

Les persones, a diferència dels fotons, els àtoms o els euros, no són intercanviables i són difícils de simular per la seva heterogeneïtat i la seva complexitat: les persones són diverses en els seus interessos i motivacions, en les seves característiques físiques i en les seves

experiències; dins de la pròpia heterogeneïtat de les persones, el comportament individu és multidimensional: es mou dins de l'espai amb motivacions diverses, respon als estímuls ambientals, es relaciona amb altres individus, etc.

Per delimitar l'àmbit d'estudi pel que fa referència al comportament de les persones que volem simular, aquesta tesi es vol centrar únicament en les pautes de moviment dels vianants dins de l'espai i, si és necessari, aprofundir amb posterioritat en altres aspectes del seu comportament o de la seva experiència en els espais on es desenvolupen.

## 2.2 Característiques dels espais

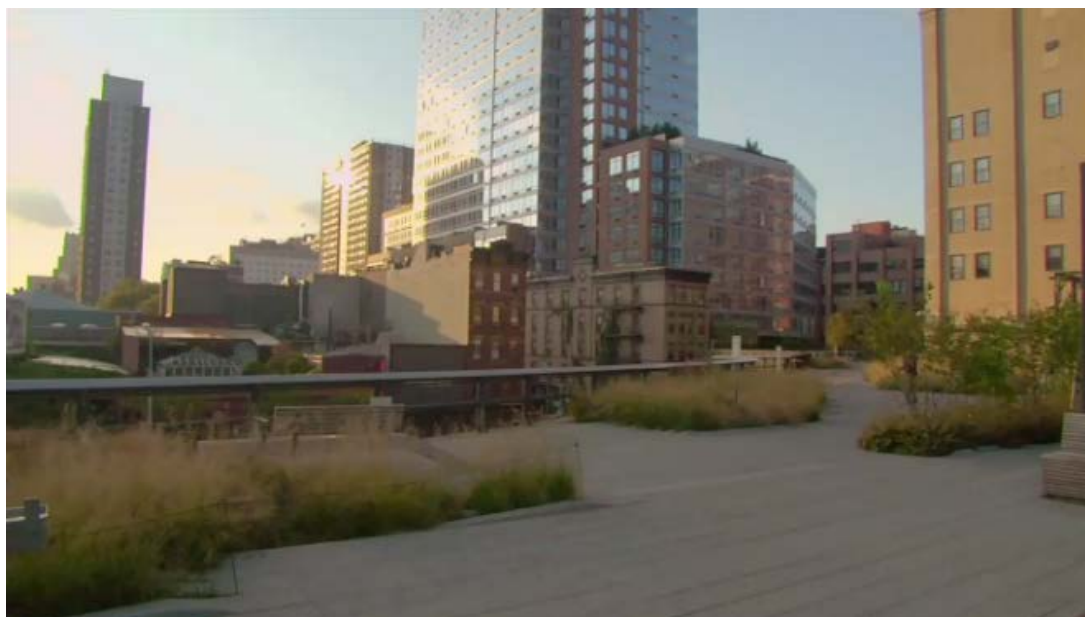
La tesi proposa modelar la geometria de les "*desire lines*" a partir de l'anàlisi el moviment de les persones a quan transiten sobre elements enjardinats. Com a conseqüència, els espais a analitzar han de permetre el creixement i l'erosió de la vegetació, i tenir un volum de circulació de vianants suficientment important per a què es apareguin aquests elements. Es proposa l'anàlisi de dos tipus d'espais de característiques complementaries:

- Espais predominantment enjardinats, amb alguns camins pavimentats existents, que permetin visualitzar la xarxa de camins que es genera amb el pas dels vianants sobre la xarxa original projectada (Il·lustració 2)
- Espais predominantment pavimentats, amb alguns elements enjardinats de petita dimensió, que permetin esbrinar la lògica del moviment dels vianants (Il·lustració 2)



Il·lustració 1: Espai predominantment enjardinat a Brasília (Brasil). Font: Google, 2013.

Els casos d'estudi han de permetre validar el model i exemplificar diferents característiques topogràfiques, tipus de vegetació, punts d'accés, elements d'atracció, elements de barrera, etc.



Il·lustració 2: Espai predominantment pavimentat a The High Line (New York City). Font: Fotografia de Urbanized (Gary Hustwitt, 2011)

### 3 Objectius

*"All buildings are predictions. All predictions are wrong."*

— Stewart Brand (Arquitecte), How Buildings Learn: What Happens After They're Built

Els Arquitectes acostumen a pensar en les nostres obres com un objecte acabat, però no només els espais que projecten continuen evolucionant un cop acabada la seva construcció, sinó que només agafen sentit un cop aquestes son utilitzades. Aquest procés d'evolució dels espais es fa especialment palès en el cas de les ciutats, que es transformen de manera constant per les interaccions que es produeixen entre seus habitants i entre aquests habitants i el seu entorn.

Disposar d'eines per a modelar el comportament de les persones en els espais públics i en els edificis hauria de permetre concebre espais d'acord a les necessitats i a la seguretat dels usuaris. Conèixer la lògica del moviment natural dels vianants mitjançant models permetria dotar als projectistes de mecanismes per adaptar els espais:

- Com una eina per dissenyar els espais d'acord amb les necessitats dels usuaris, per facilitar-ne l'orientació o per conduir els fluxos de vianants de manera indirecta a elements d'interès
- Per dificultar que els vianants circulin per espais que requereixin protecció o allunyar-los d'espais insegurs
- Fent els espais més resilient a les modificacions que tard o d'hora faran els usuaris per adaptar-los a les seves necessitats

A partir d'un model de les preferències de circulació dels vianants a partir de les "*desire lines*" (Il·lustració 3) modelant els individus com a agents dins d'un software de simulació, aquesta

tesi vol anticipar l'ús que faran els usuaris dels espais, de la mateixa manera com les marques que deixen les persones en utilitzar objectes es poden utilitzar com a pista per millorar el disseny de nous artefactes <sup>1</sup>. Aquest coneixement hauria de servir de base per a modelar fenòmens més complexos, tant a escala urbana com en l'interior dels edificis.



Il·lustració 3: "Desire lines" al Campus Universitari de Stuttgart-Vaihingen (esquerra) i a Brasilia (dreta).  
Font: Helbing et al., 1997

## 4 Antecedents

*"At the core... is the idea that people should design for themselves their own houses, streets and communities. This idea... comes simply from the observation that most of the wonderful places of the world were not made by architects but by the people"*

— Christopher Alexander (Arquitecte), *A Pattern Language*

És possible que els vianants, de manera espontània i sense planificació ni organització centralitzada, i actuant segons el seu propi interès, puguin arribar a generar una xarxa de camins que serveixi les seves necessitats millor que la projectada per un expert?

Molts sistemes viaris que connecten localitats i fins i tot traçats de carrer es van originar a partir de camins fets sense planificació per persones o bé animals <sup>2</sup>. Experiències com el "*open source*", el "*creative commons*", la Vikipèdia o el "*crowdfunding*" són exemples de l'èxit d'alguns moviments "*grassroots*" per aconseguir resultats equivalents a les organitzacions tradicionals <sup>3</sup>. L'enfrontament entre l'enfocament "*top down*" de Robert Moses respecte el "*bottom up*" de Jane Jacobs en el projecte de renovació de Greenwich Village a Manhattan ens pot fer pensar sobre la capacitat d'un conjunt d'individus per prendre millors decisions

<sup>1</sup> Carl Myhill, "Commercial Success by Looking for Desire Lines," in *Computer Human Interaction*, ed. Masood Masoodian, Steve Jones, and Bill Rogers, vol. 3101 (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004), 293–304, [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-27795-8\\_30](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-27795-8_30).

<sup>2</sup> Dirk Helbing et al., "Self-organizing Pedestrian Movement," *Environment and Planning B: Planning and Design* 28, no. 3 (2001): 361–383.

<sup>3</sup> Eric S. Raymond, *The Cathedral & the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary*, First Edition (O'Reilly Media, 1999).

respecte d'un sol individu, independentment de l'expertesa d'aquest, en el que s'ha anomenat "*wisdom of the crowds*"<sup>4</sup>.

Aquesta tesi parteix també de l'experiència d'anàlisi del moviment de les persones discapacitades en entorns urbans de la Tesi de Màster en Gestió i Valoració Urbana<sup>5</sup> on s'estudiava l'accessibilitat del nucli antic de Tossa de Mar.

Dins de l'interès en profunditzar en la modelització del moviment de les persones en entorns urbans o arquitectònics, s'ha escollit un tema que permeti contrastar els resultats del model amb la realitat que es vol modelitzar. L'anàlisi de la manifestació física de les pautes de moviment dels vianants en forma de "*desire lines*" ha de permetre avaluar l'ajust el model sense haver de recórrer necessàriament a tècniques de recopilació de dades com comptadors de pas, enquestes, captura de vídeo amb seguiment de moviment, experiments amb voluntaris o seguiment per GPS<sup>6</sup>.

## 5 Estat de l'art

*"Imagine how hard physics would be if electrons could think"*

— Murray Gell-Mann (premi Nobel de Física de 1969)

### 5.1 Comportament dels vianants

La literatura sobre la modelització del comportament dels vianants s'ha centrat principalment en les situacions d'alta ocupació<sup>7</sup> i dintre d'aquests casos en l'evacuació d'espais en situació d'emergència, sobretot per evitar situacions d'esclafament i per minimitzar el temps d'evacuació dels recintes.

Existeixen nombrosos models per explicar el comportament de les persones en funció de l'enfocament (analític, metodològic o de representació)<sup>8</sup> que es poden classificar segons la seva aproximació (basats en fluxos, basats en entitats o basats en agents)<sup>9</sup> i en funció de si analitzen fenòmens de curta o de llarga durada (Il·lustració 4).

---

<sup>4</sup> James Surowiecki, *The Wisdom of Crowds* (Anchor, 2005).

<sup>5</sup> Francesc Valls, "Metodología para la evaluación de rutas óptimas en entornos urbanos a partir de datos de LTS" (Masters Research thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010), <http://hdl.handle.net/2099.1/11696>.

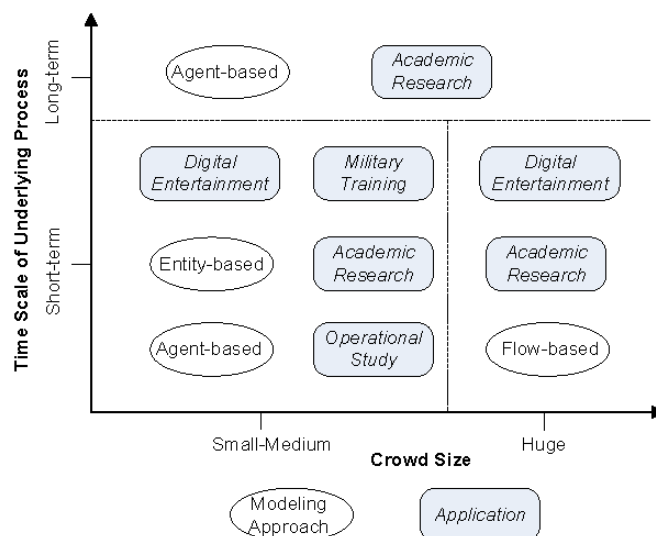
<sup>6</sup> Harry Timmermans, ed., *Pedestrian Behavior: Data Collection and Applications*, 1st ed. (Emerald Group Publishing Limited, 2009).

<sup>7</sup> Michael Schreckenberg and Som Deo Sharma, eds., *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2002*, 2002nd ed. (Springer, 2001), <http://www.springer.com/mathematics/applications/book/978-3-540-42690-5>; Wolfram W. F. Klingsch et al., eds., *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 2010th ed. (Springer, 2010), <http://www.springer.com/mathematics/applications/book/978-3-642-04503-5>.

<sup>8</sup> Ferdinanda Elfrida Hubertina Wijermans, "Understanding Crowd Behaviour: Simulating Situated Individuals" (Dissertation, University of Groningen, 2011), 79, <http://irs.ub.rug.nl/ppn/333429745>.

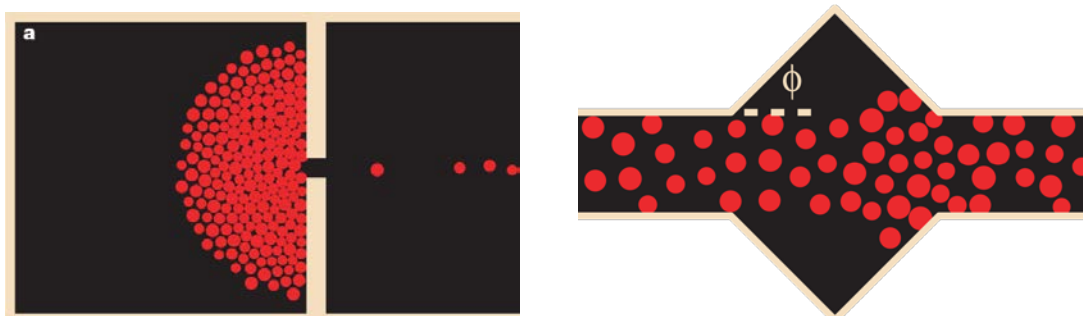
<sup>9</sup> Suiping Zhou et al., "Crowd Modeling and Simulation Technologies," *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 20, no. 4 (November 2010): 20:1–20:35, doi:10.1145/1842722.1842725.





Il·lustració 4: Distribució de models de multituds. Font: Zhou et al., 2010

En l'actualitat, el model més complet per a descriure el moviment dels vianants és el Model de Força Social (*Social Force Model*) de Dirk Helbing <sup>10</sup>, que modela els vianants com a partícules sotmeses a una superposició de forces (físiques, socials i psicològiques) que explica molts fenòmens observats, alguns de contra-intuitius, que es produeixen en les dinàmiques d'evacuació o d'alta ocupació (Il·lustració 5).



Il·lustració 5: Exemples de simulacions amb el Social Force Model de Helbing. Font: Helbing et al., 2000

El model de Helbing ha estat ajustat per a poder simular fenòmens més complexos, com el cas del moviment de vianants aïllats o en situacions d'escassa ocupació <sup>11</sup> i per a incorporar la dinàmica de moviment de grups de persones <sup>12</sup>. En ambdós casos els models incorporen paràmetres addicionals i com a conseqüència els models resultants son més complexos.

<sup>10</sup> Dirk Helbing and Péter Molnár, "Social Force Model for Pedestrian Dynamics," *Physical Review E* 51, no. 5 (May 1995): 4282–4286, doi:10.1103/PhysRevE.51.4282; Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamás Vicsek, "Simulating Dynamical Features of Escape Panic," *Nature* 407, no. 6803 (September 28, 2000): 487–490, doi:10.1038/35035023.

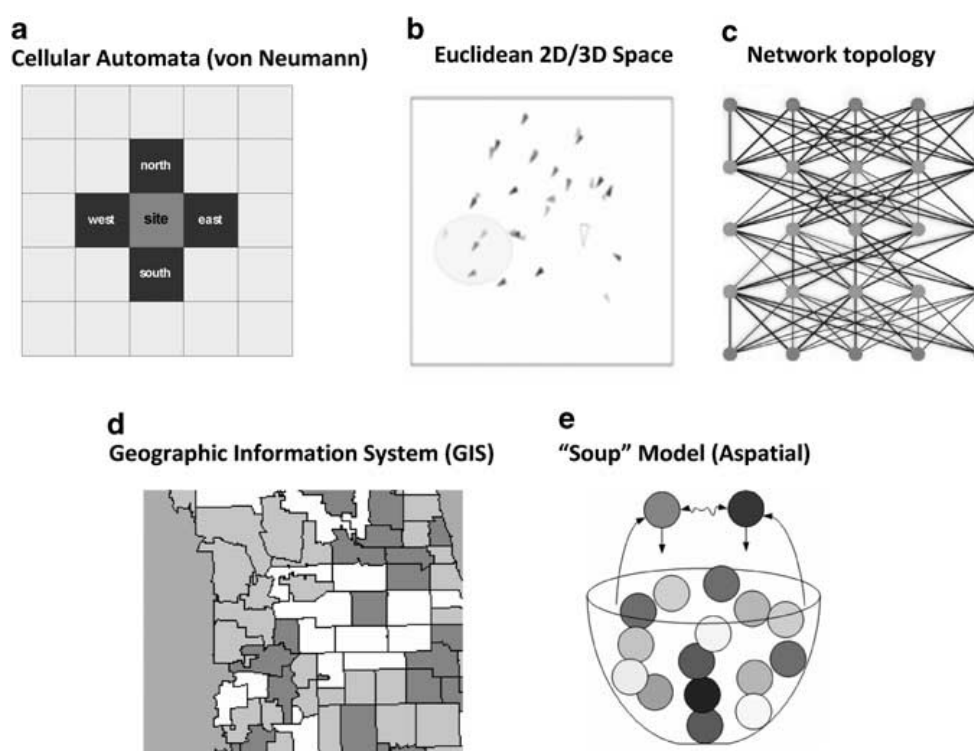
<sup>11</sup> T. I. Lakoba, "Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution," *SIMULATION* 81, no. 5 (May 1, 2005): 339–352, doi:10.1177/0037549705052772.

<sup>12</sup> Mehdi Moussaïd et al., "The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics," ed. Giuseppe Chirico, *PLoS ONE* 5, no. 4 (April 7, 2010): e10047, doi:10.1371/journal.pone.0010047.

## 5.2 Models basats en agents

Els models són una abstracció de la realitat que ens permeten explicar fenòmens i conduir-nos a fer-nos noves preguntes i a prendre decisions fonamentades <sup>13</sup>. Els models basats en agents (*Agent-Based Models* o ABM) i les simulacions multi-agent (*Multi-Agent Simulations* o MAS) són tècniques utilitzades en les ciències socials <sup>14</sup>, sovint combinades amb la teoria de jocs, per modelar el comportament dels individus o institucions a partir de les micro-interaccions entre ells mateixos o entre ells i el seu entorn, enfront de l'enfocament macroscòpic dels models basats en equacions.

Existeixen diferents topologies que es poden utilitzar en models basats en agents <sup>15</sup> en funció del tipus d'espai en el que es desenvolupen i relacionen (Il·lustració 6):



Il·lustració 6: Topologies de models d'agents. Font: Macal i North, 2010

A diferència dels models basats en Autòmats Cel·lulars (*Celular Automata*) <sup>16</sup>, els models basats en agents s'ajusten millor a la representació del moviment de les persones dins dels espais ja que no tenen les limitacions que imposa la retícula. En canvi, els models basats en

<sup>13</sup> Joshua M. Epstein, "Why Model?," *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11, no. 4 (2008): 12.

<sup>14</sup> John H. Miller and Scott E. Page, *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life* (Princeton University Press, 2007).

<sup>15</sup> C M Macal and M J North, "Tutorial on Agent-based Modelling and Simulation," *Journal of Simulation* 4, no. 3 (September 2010): 151–162, doi:10.1057/jos.2010.3.

<sup>16</sup> Hubert Ludwig Klüpfel, "A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation" (Ph.D., Universität Duisburg–Essen, 2003), <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet/Document/5477/Disskluepfel.pdf>.

Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) són molt prometedors <sup>17</sup> però els programes de SIG encara són encara massa feixucs per implementar aquesta funcionalitat d'una manera pràctica.

### 5.3 Complexitat i auto-organització

Manifestacions complexes i organitzades poden aparèixer a partir de les interaccions no lineals entre individus que segueixen regles senzilles <sup>18</sup>. L'emergència de la cultura com a comportament col·lectiu s'ha modelat a partir de la interrelació entre individus degut al seu desig de coherència interna i de conformitat amb la resta de la societat <sup>19</sup>. D'aquesta manera, els individus tendeixen a adaptar-se amb lleugeres variacions als patrons de conducta de la societat, degut a que és més beneficiós per ells, i d'aquesta manera reforcen les pautes de conducta predominants.

A conseqüència d'aquestes interaccions lineals entre individus, aquest sistema acostumen ser robustos davant petites alteracions, però alhora poden a presentar "tipping points" <sup>20</sup> on petites influències poden causar grans canvis.

### 5.4 Formació d'estructures complexes

La relació dels éssers vius amb el seu entorn és essencial per a la seva supervivència; en el món natural trobem exemples de colònies d'organismes tan simples com l'unicel·lular *Physarum polycephalum* que, sense estar dotat de cervell, és capaç de tenir una memòria espacial col·lectiva <sup>21</sup> i no expandir-se a les zones que ja ha explorat on no hi ha aliment. Els insectes socials com la formiga *Iridomyrmex humilis* també són capaços de buscar aliment actuant d'una manera coordinada i complexa a partir de regles senzilles <sup>22</sup>.

En el cas d'humans, els mecanismes de formació dels camins de muntanya en forma de zig-zaga <sup>23</sup> han estat estudiats mitjançant "Active Walkers" a partir de considerar l'aversion del vianant a ascendir o descendir per pendents excessivament abruptes i a realitzar canvis de rumb sobtats, dos condicionants que s'expliquen com a regles intuïtives per evitar caigudes.

---

<sup>17</sup> Alison J. Heppenstall et al., eds., *Agent-Based Models of Geographical Systems* (Springer, 2012), <http://www.casa.ucl.ac.uk/ABM.pdf>.

<sup>18</sup> Thomas C. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*, Revised (W. W. Norton & Company, 1978).

<sup>19</sup> J. Bednar et al., "Emergent Cultural Signatures and Persistent Diversity: A Model of Conformity and Consistency," *Rationality and Society* 22, no. 4 (October 25, 2010): 407–444, doi:10.1177/1043463110374501.

<sup>20</sup> P. J. Lamberson and Scott E. Page, "Tipping Points," *Quarterly Journal of Political Science* 7, no. 2 (April 5, 2012): 175–208, doi:10.1561/100.00011061.

<sup>21</sup> Chris R. Reid et al., "Slime Mold Uses an Externalized Spatial 'memory' to Navigate in Complex Environments," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, no. 43 (October 23, 2012): 17490–17494, doi:10.1073/pnas.1215037109.

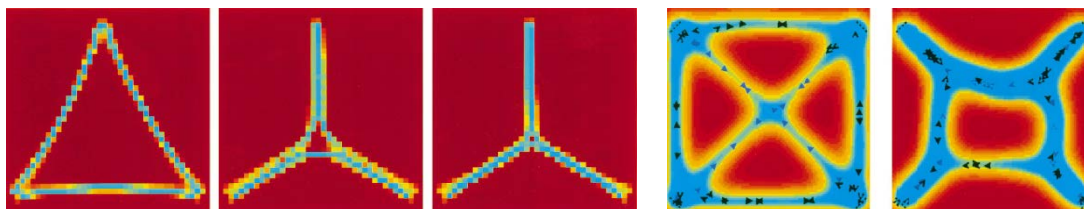
<sup>22</sup> J. -L. Deneubourg et al., "The Self-organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant," *Journal of Insect Behavior* 3, no. 2 (March 1990): 159–168, doi:10.1007/BF01417909.

<sup>23</sup> S. J. Gilks and J. P. Hague, "Mountain Trail Formation and the Active Walker Model," *International Journal of Modern Physics C* 20, no. 06 (June 2009): 869–890, doi:10.1142/S0129183109014059.



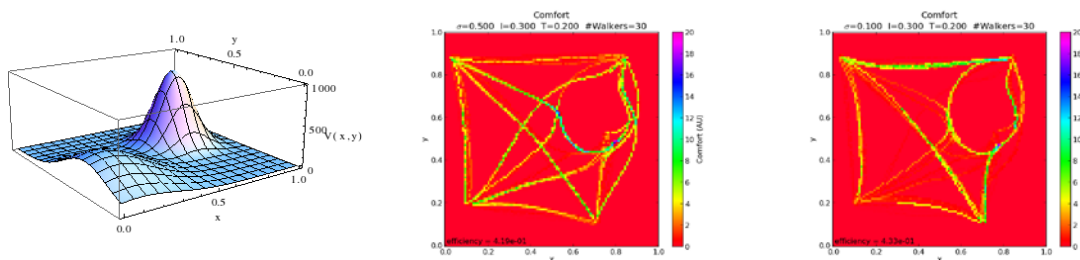
## 5.5 Formació de “desire lines”

Existeixen algunes investigacions empíriques <sup>24</sup> sobre la formació de camins per part de les persones; en el cas concret de les “*desire lines*”, Helbing ha analitzat analíticament aquests mecanismes <sup>25</sup> per casos sintètics modificant el paràmetre de regeneració de la vegetació (Il·lustració 7):



Il·lustració 7: “Desire lines” en exemples sintètics amb diferents paràmetres. Font: Helbing et al., 1997

També analíticament aplicant el model de Helbing sobre una topografia sintètica <sup>26</sup> s’obtenen resultats semblants als observats a la realitat (Il·lustració 8):



Il·lustració 8: Diferents paràmetres sobre topografia sintètica. Font: Girdhar i Antonaglia, 2013

Cal destacar que tot i que el sistema de camins que optimitza els desplaçaments amb el mínim de despesa en infraestructura de carreteres per a un conjunt de punts és un *Minimal Steiner Tree* <sup>27</sup>, aquesta solució geomètrica no té en compte les diferents intensitats de circulació entre els punts ni les preferències dels vianants.

Des del punt de vista experimental, s’ha estudiant la formació de camins en condicions de laboratori <sup>28</sup> en exercicis on es demana als subjectes que visitin simultàniament una sèrie

<sup>24</sup> Klaus Humpert, Sibylle Becker, and Klaus Benner, “Entwicklung Großstädtischer Agglomerationen,” in *Prozeß Und Form “Natürlicher Konstruktionen,”* ed. Klaus Teichmann and Joachim Wilke, 11th ed., Der Sonderforschungsbereich 230 (Berlin: Ernst & Sohn, 1995), 172–193; Eda Schaur, *Ungeplante Siedlungen. Charakteristische Merkmale - Wegesystem, Flächenteilung,* Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke IL39 (Stuttgart: Institut für Leichte Flächentragwerke, 1991), <http://www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=206294>.

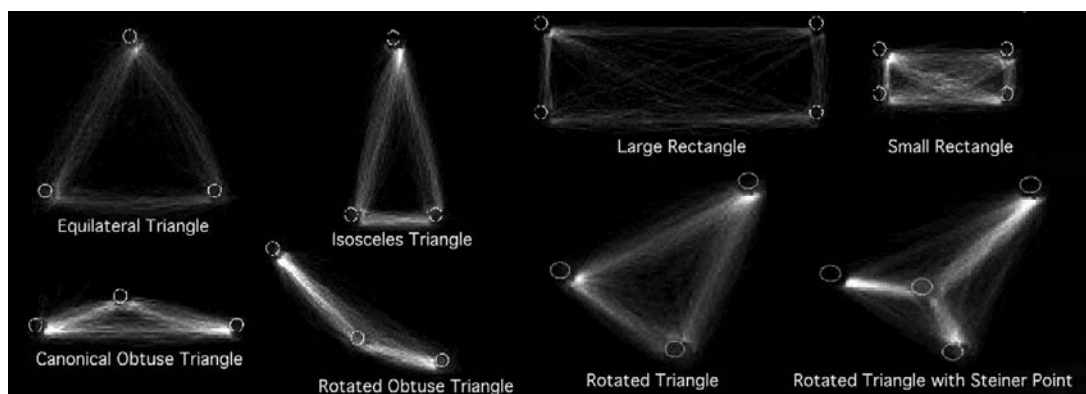
<sup>25</sup> Dirk Helbing, Joachim Keltsch, and Péter Molnár, “Modelling the Evolution of Human Trail Systems,” *Nature* 388, no. 6637 (July 3, 1997): 47–50, doi:10.1038/40353.

<sup>26</sup> Anuj Girdhar and James Antonaglia, *Investigation of Trail Formation with the Active Walker Model, Atomic-Scale Simulations* (University of Illinois, May 6, 2013), <http://courses.physics.illinois.edu/phys466/projects/2013/Team1.report.pdf>.

<sup>27</sup> R.L. Goldstone, A. Jones, and M.E. Roberts, “Group Path Formation,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 36, no. 3 (May 2006): 611–620, doi:10.1109/TSMCA.2005.855779.

<sup>28</sup> Ibid.; Robert L. Goldstone and Michael E. Roberts, “Self-organized Trail Systems in Groups of Humans,” *Complexity* 11, no. 6 (July 2006): 43–50, doi:10.1002/cplx.20135.

de localitzacions, disminuint en temps real el cost de desplaçament de cada punt en funció del nombre de persones que hi ha circulat anteriorment (Il·lustració 9).



Il·lustració 9: Formació de camins en experiments de laboratori. Font: Goldstone et al., 2006

## 6 Hipòtesis inicials

*“There are two possible outcomes: if the result confirms the hypothesis, then you've made a measurement. If the result is contrary to the hypothesis, then you've made a discovery”*

— Enrico Fermi (premi Nobel de Física de 1938)

La hipòtesi de treball d'aquesta tesi és que les zones mancades de vegetació que podem observar en forma de camins o de drecceres en espais públics total o parcialment enjardinats (*desire lines*), provenen de l'alteració del sòl per part de les petjades dels vianants en circular per aquests espais en intentar minimitzar el seu esforç individual de traslladar-se d'un lloc a un altre. La interacció dels efectes del comportament dels vianants al llarg del temps acaba conformant la geometria d'aquests elements com a fenomen emergent de l'activitat col·lectiva dels vianants, a partir d'una lògica de comportament relativament simple dels individus.

### 6.1 Hipòtesi sobre el comportament del sòl

El tipus de vegetació on es manifesten aquests camins acostuma a ser de tipus herbàcia. Aquest tipus de vegetació té la capacitat de regenerar-se un cop malmesa i tornar a créixer, de manera que una alteració aleatòria sobre l'àrea d'estudi (per exemple un ramat d'animals pasturant) no tindria un efecte de formació d'elements estructurats, mentre que una alteració repetida en una mateixa zona sí que la presentaria (com l'àrea davant d'una porteria de futbol o la gespa dels *tees* de sortida dels camps de golf).

La compactació del sòl alenteix la regeneració de la vegetació i alhora facilita el trànsit de vianants en proporcionar una millor estabilitat davant les petjades, donat que la pressió sota el taló en caminar pot arribar a 14 Kg/cm<sup>2</sup>. Aquest fenomen de facilitació del trànsit per la compactació del ferm també es produeix en caminar sobre neu.

## 6.2 Hipòtesi sobre el comportament dels vianants

Quan observem les persones circular per l'espai públic podem veure que no manifesten un grau de concentració massa elevat: escolten música, conversen amb altres persones i en alguns casos fins i tot llegeixen el diari. La hipòtesi de treball és que el comportament que es vol modelar és principalment governat per automatismes de comportament, és a dir, els vianants no es comporten com a actors racionals que explorin exhaustivament totes les seves possibilitats d'acció sinó que apliquen unes conjunt regles apreses a partir de les experiències passades.

Concretament, suposarem que els vianants intenten arribar a la seva destinació amb la màxima comoditat, dins un temps raonable i amb la menor càrrega cognitiva possible <sup>29</sup>. El model ha d'incorporar aquest comportament en els agents que representen les persones de manera que es proposen les següents regles:

- Els agents tenen com a objectiu arribar a la seva destinació a partir del seu origen, i dins del període de simulació, intentant evitar canvis bruscos de direcció o les col·lisions amb altres vianants
- Els agents intentaran maximitzar la comoditat del trajecte, entès com el mínim esforç emprat en el trajecte, en quant a la locomoció com a l'esforç cognitiu, sense admetre desviacions respecte el camí més curt superior a un percentatge que haurà de ser determinat
- Els agents percebran únicament el seu entorn immediat, principalment en la direcció del sentit de la locomoció, i per tant no tindran un coneixement total del seu entorn
- Es caracteritzarà la topografia a partir de la seva pendent en relació a la comoditat de pas pels vianants
- Diferents orígens i destinacions poden tenir diferents intensitats d'utilització i ser utilitzades en múltiples combinacions

## 6.3 Hipòtesi sobre l'organització emergent

La hipòtesi que explicaria la formació de les dreceres és que persones amb interessos diferents, acaben utilitzant les mateixes rutes perquè són més còmodes i en fer-ho reforcen la comoditat d'aquestes rutes, en un fenomen semblant al de un procés de Poyla.

Degut que la magnitud de transit és petita, cal emfasitzar que estem davant d'un cas oposat al de les xarxes de transport o les situacions de vianants on hi ha una alta ocupació, on l'ús intensiu d'un trajecte pot tenir un efecte dissuasiu i impulsar en la recerca de vies alternatives.

---

<sup>29</sup> Bill Hillier, *Space Is the Machine: A Configurational Theory of Architecture* (Space Syntax, 2007), <http://www.spacesyntax.com/>; Carlo Ratti, "Space Syntax: Some Inconsistencies," *Environment and Planning B: Planning and Design* 31, no. 4 (2004): 487–499, doi:10.1068/b3019; Bill Hillier and Alan Penn, "Rejoinder to Carlo Ratti," *Environment and Planning B: Planning and Design* 31, no. 4 (2004): 501–511, doi:10.1068/b3019a.

## 7 Metodologia

*"Would you tell me, please, which way I ought to go from here?"*

*"That depends a good deal on where you want to get to."*

— Lewis Carroll, *Alice in Wonderland*

La metodologia proposada consisteix en dues etapes: 1) observació del comportament dels vianants 2) anàlisi de la morfologia de les "*desire lines*" i 3) procés iteratiu d'elaboració i validació del model.

### 7.1 Observació del comportament dels vianants

Dins de la complexitat de l'estudi dels aspectes que incideixen en la lògica del moviment dels vianants, aquesta tesi es vol centrar en els patrons de moviment del seu trànsit per l'espai urbà on el desplaçament es produeix principalment per motivacions de tipus finalista (arribar a la destinació amb una sèrie de condicionants explicats en les hipòtesis de treball de l'apartat 6.2) i no en altres valors que pugui tenir aquest desplaçament.

Es proposa observar el comportament dels vianants per contrastar la informació obtinguda amb els models existents i amb el model objecte de la tesi: de manera directa, amb enregistraments en vídeo, amb fotografia de llarga exposició o amb experiments controlats (per exemple recobrint el paviment d'un vestíbul amb paper per observar les empremtes de les persones en desplaçar-se per l'espai).

A partir dels models existents en la literatura, contrastats amb l'estudi dels mecanismes que fan servir els vianants en els casos d'estudi, juntament amb la pròpia experiència personal en circular per aquests espais es farà un primer model en unes condicions simplificades. A partir de les conclusions que es puguin treure d'aquest model i de l'anàlisi de la sensibilitat als diferents paràmetres, es pot decidir afegir paràmetres addicionals per comprovar si aquests milloren la seva capacitat predictiva del model o en la riquesa dels aspectes simulats.

### 7.2 Anàlisi de la morfologia de les "*desire lines*"

La segona etapa de la metodologia consisteix en l'observació de la morfologia de les drecceres en diversos casos d'estudi per poder elaborar una hipòtesi dels elements que cal tenir en compte en l'elaboració del model. Degut a que es vol que el model sigui el màxim de general possible, es planteja analitzar 1) casos d'estudi repartits arreu del món en cultures, climes i contextos d'utilització diferents per poder identificar tant els elements comuns com els elements que els diferencien i 2) casos d'estudi dins de l'experiència personal propera, que haurien de permetre tenir una percepció subjectiva com a usuari i poder seguir la seva evolució.

Es proposa analitzar la geometria de les "*desire lines*" mitjançant fotografia aèria, donat que amb la resolució de les ortofotos recents és possible distingir aquests elements i en molts casos és factible fer-ne el seguiment de la sèrie històrica en el temps, per observar els canvis

en la morfologia i la relació d'aquests canvis amb l'alteració del context, com la demolició o construcció d'edificis, l'aparició noves activitats, etc. Aquest anàlisi es vol complementar amb treball de camp mitjançant mesuraments directes i restitució fotogràfica.

### 7.3 Elaboració i validació del model

El procés d'elaboració i validació del model es farà en primer lloc implementant un model informàtic sintètic a partir de les observacions realitzades del comportament de les persones.

Aquest model ha de servir per fer un escombrat del l'espai de paràmetres (*parameter space scan*) i un anàlisi de sensibilitat del model a aquests paràmetres mitjançant la introducció de variabilitat o de soroll. També es farà un anàlisi de la incidència de la resolució discretització temporal o espacial, i de l'estabilitat i el nombre d'iteracions necessàries per fer a convergir el model.

A partir d'aquest primer model es seguirà un procés iteratiu amb diversos casos d'estudi, per a poder ajustar progressivament el model, incorporant o eliminant paràmetres i ajustant els valors d'aquests:

- a) Predicció amb el model d'un cas d'estudi existent (*training set*)
- b) Comprovació del grau d'ajust de la predicció amb la realitat (*testing set*)
- c) Ajust del model

L'heterogeneïtat dels individus i el fet que una mateixa persona pugui prendre diferents decisions en diferents moments degut al lliure albir, tindrà com a conseqüència el procés estudiat sigui estocàstic (no determinista). Per tant, els resultats que puguin obtenir-se de la seva simulació seran forçosament de tipus probabilístic, en forma de percentatge de possibilitats que un camí es materialitzi en cadascun dels punts de l'espai.

## 8 Viabilitat

La viabilitat de la Tesi depèn principalment de dos factors: la disponibilitat de dades per elaborar el model i les capacitats de les eines informàtiques disponibles per desenvolupar el model.

### 8.1 Disponibilitat de dades

Les dades que es faran servir s'obtiniran de dues fonts: treball de camp amb l'observació d'espais i del comportament de les persones i ortofotos de casos d'estudi d'arreu del món, donat que l'escala del fenomen a modelar permet que els efectes siguin observables a la resolució dels vols recents i que en alguns casos es disposa de la sèrie històrica a Google Earth.

## 8.2 Disponibilitat d'eines informàtiques

La programació orientada a objectes és adequada per a desenvolupar models basats en agents: els objectes encapsulen les dades (com la posició de cada persona simulada, l'estat del sòl) i es comuniquen mitjançant una interfície (distàncies entre agents, modificacions dels agents sobre el sòl).

Les eines informàtiques que es preveu fer servir per a desenvolupar el model d'agents són de codi obert i de lliure distribució: es preveu fer servir NetLogo <sup>30</sup> com a software de prototipus pel model; si el model s'ha d'escalar per simular una gran quantitat d'agents o comportaments molt complexos es preveu fer servir el software RePast Symphony <sup>31</sup>, Processing <sup>32</sup> o MASON <sup>33</sup>. Les quatre eines estan basades en Java i corren sobre Windows, OS X i Linux. L'explotació estadística es preveu realitzar amb el llenguatge de programació de codi obert multi-plataforma R <sup>34</sup>. Es preveu publicar el model resultant com a codi lliure a Internet perquè pugui ser validat per la comunitat científica.

## 9 Pla de treball

El pla de treball consta de dos apartats: recopilació de dades i elaboració del model. Aquestes dues fases aniran seguides de la redacció de la tesi i la difusió dels resultats en forma d'articles en revistes científiques.

### 9.1 Recopilació de dades

La recopilació de dades es farà com a pas previ a la implementació del model, però durant la fase d'implementació es continuarà amb aquesta tasca per validar el model.

#### 9.1.a Estat de l'art

La elaboració de l'estat de l'art es farà a partir de la revisió de la bibliografia, i de l'estudi de les diferents plataformes de software per elaborar el model:

- En quan a la bibliografia s'examinarà la producció dels autors i centres de referència i les cites bibliogràfiques de la seva producció científica: articles en revistes, ponències en congressos, llibres, contribucions en llibres, *white papers*, etc.
- Pel que fa referència al software, s'avaluaran diferents paquets de software en funció de la plataforma on s'executen, la expressivitat del llenguatge de programació que fan

---

<sup>30</sup> Uri Wilensky, *NetLogo* (Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, 1999), <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

<sup>31</sup> Michael J North et al., "Complex Adaptive Systems Modeling with RePast Symphony," *Complex Adaptive Systems Modeling* 1, no. 1 (2013): 3, doi:10.1186/2194-3206-1-3.

<sup>32</sup> Ben Fry and Casey Reas, *Processing*, n.d., <http://www.processing.org/>.

<sup>33</sup> George Mason University's Evolutionary Computation Laboratory and the GMU Center for Social Complexity, MASON, version 17, 2013, <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>.

<sup>34</sup> R. Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Vienna, Austria, 2012), <http://www.R-project.org/>.



servir, les capacitats de les seves API (*Application Programming Interface*), si són de codi obert, la escalabilitat davant problemes complexos, etc.

### 9.1.b Selecció i recopilació de dades sobre "desire lines"

Es planteja analitzar casos d'estudi repartits arreu del món i casos d'estudi dins de l'experiència personal pròpia:

- A partir de les eines de cartografia en-línia es seleccionaran una sèrie de casos arreu del món i es digitalitzarà la geometria amb eines GIS. També es preveu fer servir la cartografia de *Open Street Map* per a contrastar els resultats
- També s'elaboraran una sèrie de fitxes d'exemples propers a Barcelona amb fotografies i, si és necessari, aixecaments planimètrics per poder mesurar distàncies, angles, radis, topografia, etc.

### 9.1.c Selecció i recopilació de dades del moviment persones

La selecció dels comportaments de les persones que es simularan servirà per a programar les regles que determinaran el moviment dels agents:

- Definició dels aspectes inicials a tenir en compte a partir d'un inventari dels diferents enfocaments existents en l'estat de l'art per a la simulació del moviment dels vianants
- Investigació tècniques de captura i la seva aplicabilitat, valorant la dificultat d'implementació i les avantatges que poden aportar
- Recerca de models biomecànics de moviment de la locomoció humana i variabilitat dins de la població: llargada de la passa, rotació del genoll, rotació del turmell, pressió sobre el terreny, etc.
- Recerca sobre la percepció: angle de visió, orientació espacial, percepció de l'entorn immediat

## 9.2 Implementació del model

El model s'implementarà iterativament en tres fases: implementació, validació i ajust.

### 9.2.a Implementació inicial del model

A partir de l'estat de l'art s'implementarà el model a partir de la informació obtinguda a partir de la selecció i recopilació de dades del moviment de les persones:

- Assajant per separat de cada regla que es programi a l'agent
- Analitzant per parells les regles que es considerin més rellevants i analitzant les interaccions entre elles

### 9.2.b Validació del model

El model en desenvolupament s'anirà validant a mesura que s'avanci el procés de simulació:

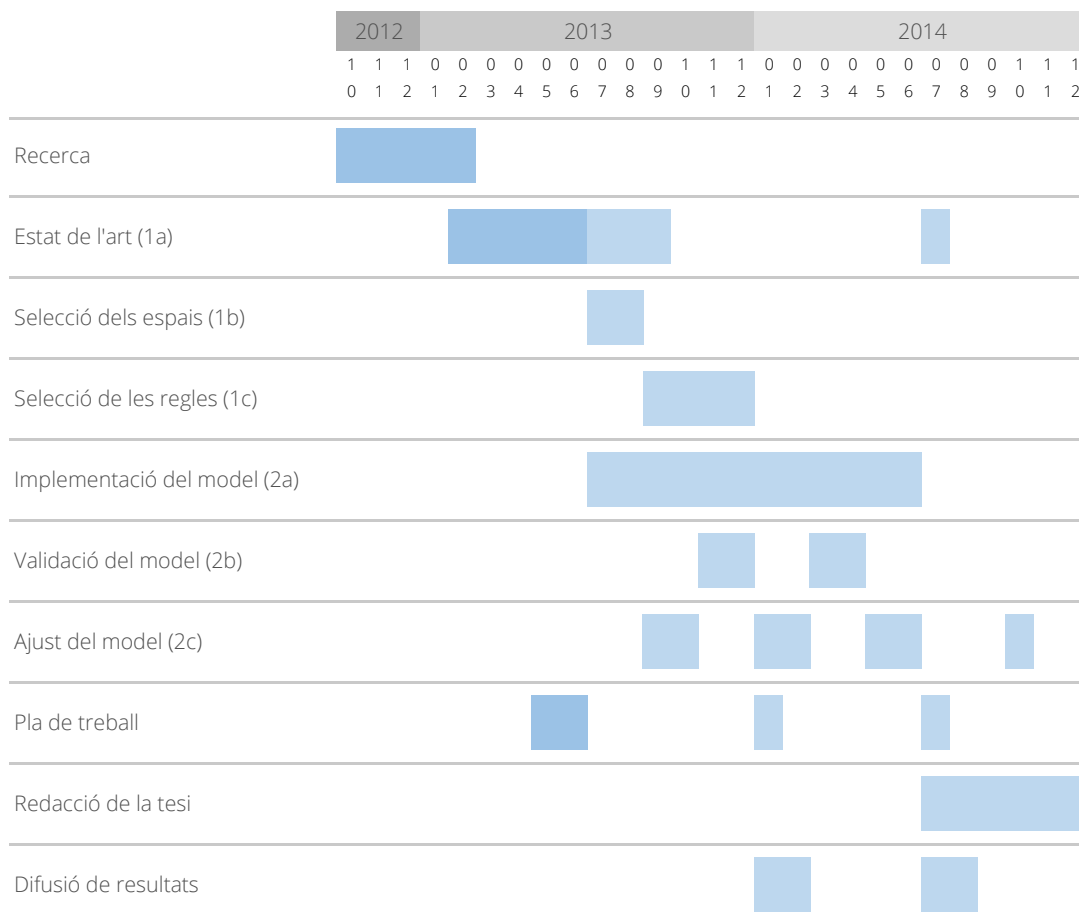
- Calibrant el model a casos reals (*training set*) i comprovant el resultat predits amb altres casos reals (*control set*)

- Analitzant la sensibilitat del model a canvis de paràmetres, precisió en la discretització del temps, tipus de discretització de l'espai, interaccions entre regles
- Estudi de la formació d'estructures complexes emergents

### 9.2.c Ajust del model

A partir de les dades de cada cicle de validació, s'aniran ajustant els paràmetres i es comprovarà l'aplicabilitat del model i la validesa de les hipòtesis. D'aquesta manera es retocarà el model per millorar la seva capacitat d'explicació dels fenòmens observats en edificis i espais públics.

## 10 Estimació de calendari



## 11 Bibliografia

- Alexander, Christopher, Sara Ishikawa, and Murray Silverstein. 1977. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. Oxford University Press.
- Bailenson, Jeremy N., Michael S. Shum, and David H. Uttal. 1998. "Road Climbing: Principles Governing Asymmetric Route Choices on Maps." *Journal of Environmental Psychology* 18 (3) (September): 251–264. doi:10.1006/jev.1998.0095.
- . 2000. "The Initial Segment Strategy: A Heuristic for Route Selection." *Memory & Cognition* 28 (2) (March): 306–318. doi:10.3758/BF03213808.
- Deneubourg, J. -L., S. Aron, S. Goss, and J. M. Pasteels. 1990. "The Self-organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant." *Journal of Insect Behavior* 3 (2) (March): 159–168. doi:10.1007/BF01417909.
- Dorigo, Marco, Eric Bonabeau, and Guy Theraulaz. 2000. "Ant Algorithms and Stigmergy." *Future Generation Computer Systems* 16 (8) (June): 851–871. doi:10.1016/S0167-739X(00)00042-X.
- Dyke Parunak, H. 2006. "A Survey of Environments and Mechanisms for Human-Human Stigmergy." In *Environments for Multi-Agent Systems II*, edited by Danny Weyns, H. Dyke Parunak, and Fabien Michel, 3830:163–186. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11678809\\_10](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11678809_10).
- Epstein, Joshua M. 2012. *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press.
- Gilks, S. J., and J. P. Hague. 2009. "Mountain Trail Formation and the Active Walker Model." *International Journal of Modern Physics C* 20 (06) (June): 869–890. doi:10.1142/S0129183109014059.
- Girdhar, Anuj, and James Antonaglia. 2013. "Investigation of Trail Formation with the Active Walker Model." Atomic-Scale Simulations. University of Illinois. <http://courses.physics.illinois.edu/phys466/projects/2013/Team1.report.pdf>.
- Goldstone, R.L., A. Jones, and M.E. Roberts. 2006. "Group Path Formation." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 36 (3) (May): 611–620. doi:10.1109/TSMCA.2005.855779.
- Goldstone, Robert L., and Michael E. Roberts. 2006. "Self-organized Trail Systems in Groups of Humans." *Complexity* 11 (6) (July): 43–50. doi:10.1002/cplx.20135.
- Helbing, Dirk. 2001. "Traffic and Related Self-driven Many-particle Systems." *Reviews of Modern Physics* 73 (4) (December): 1067–1141. doi:10.1103/RevModPhys.73.1067.
- . 2010. "Pluralistic Modeling of Complex Systems." *Science and Culture* 76 (9-10): 315–329.
- , ed. 2012. *Social Self-Organization: Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior*. 2012th ed. Springer. <http://www.springer.com/physics/complexity/book/978-3-642-24003-4>.

- Helbing, Dirk, Lubos Buzna, Anders Johansson, and Torsten Werner. 2005. "Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions." *Transportation Science* 39 (1) (February): 1–24. doi:10.1287/trsc.1040.0108.
- Helbing, Dirk, Anders Johansson, and Stefan Lämmer. 2008. "Self-Organization and Optimization of Pedestrian and Vehicle Traffic in Urban Environments." In *The Dynamics of Complex Urban Systems*, edited by Sergio Albeverio, Denise Andrey, Paolo Giordano, and Alberto Vancheri, 287–309. Heidelberg: Physica-Verlag HD.  
[http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-7908-1937-3\\_14](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-7908-1937-3_14).
- Helbing, Dirk, Joachim Keltsch, and Péter Molnár. 1997. "Modelling the Evolution of Human Trail Systems." *Nature* 388 (6637) (July 3): 47–50. doi:10.1038/40353.
- Helbing, Dirk, Péter Molnár, Illés J. Farkas, and Kai Bolay. 2001. "Self-organizing Pedestrian Movement." *Environment and Planning B: Planning and Design* 28 (3): 361–383.
- Helbing, Dirk, Frank Schweitzer, Joachim Keltsch, and Péter Molnár. 1997. "Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems." *Physical Review E* 56 (3) (September): 2527–2539. doi:10.1103/PhysRevE.56.2527.
- Heppenstall, Alison J., Andrew T. Crooks, Linda M. See, and Michael Batty, ed. 2012. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer. <http://www.casa.ucl.ac.uk/ABM.pdf>.
- Hillier, B, A Penn, J Hanson, T Grajewski, and J Xu. 1993. "Natural Movement: Or, Configuration and Attraction in Urban Pedestrian Movement." *Environment and Planning B: Planning and Design* 20 (1): 29–66. doi:10.1068/b200029.
- Hillier, Bill. 2007. *Space Is the Machine: A Configurational Theory of Architecture*. Space Syntax. <http://www.spacesyntax.com/>.
- Hillier, Bill, and Alan Penn. 2004. "Rejoinder to Carlo Ratti." *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 (4): 501–511. doi:10.1068/b3019a.
- Humpert, Klaus, Sibylle Becker, and Klaus Benner. 1995. "Entwicklung Großstädtischer Agglomerationen." In *Prozeß Und Form "Natürlicher Konstruktionen"*, edited by Klaus Teichmann and Joachim Wilke, 11th ed., 172–193. Der Sonderforschungsbereich 230. Berlin: Ernst & Sohn.
- Klingsch, Wolfram W. F., Christian Rogsch, Andreas Schadschneider, and Michael Schreckenberg, ed. 2010. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. 2010th ed. Springer. <http://www.springer.com/mathematics/applications/book/978-3-642-04503-5>.
- Lockton, Dan. 2011. "Architecture, Urbanism, Design and Behaviour: a Brief Review." <http://architectures.danlockton.co.uk/2011/09/12/architecture-urbanism-design-and-behaviour-a-brief-review/>.
- Myhill, Carl. 2004. "Commercial Success by Looking for Desire Lines." In *Computer Human Interaction*, edited by Masood Masoodian, Steve Jones, and Bill Rogers, 3101:293–304. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.  
[http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-27795-8\\_30](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-27795-8_30).
- Passini, Romedi. 1984. *Wayfinding in Architecture*. Van Nostrand Reinhold.

- Raymond, Eric S. 1999. *The Cathedral & the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary*. First Edition. O'Reilly Media.
- Salovaara, A. 2008. "Inventing New Uses for Tools: a Cognitive Foundation for Studies on Appropriation." *Human Technology* 4 (2). Human Technology: 209–228.
- Schaur, Eda. 1991. *Ungeplante Siedlungen. Charakteristische Merkmale - Wegesystem, Flächenteilung*. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke IL39. Stuttgart: Institut für Leichte Flächentragwerke.  
<http://www.baufachinformation.de/artikel.jsp?v=206294>.
- Schlake, Bärbel Angelika. 2008. "Mathematical Models for Pedestrian Motion". Diplomarbeit, Münster: Westfälische Wilhelms-Universität Münster. <http://www.math.uni-muenster.de/u/schlake/Diplomarbeit.pdf>.
- Schweitzer, Frank. 2007. *Brownian Agents and Active Particles: Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences*. Springer.
- Still, G. Keith. 2000. "Crowd Dynamics". PhD, University of Warwick.  
<http://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/36364>.
- Therakomen, Preechaya. 2001. "Mouse.class: Experiments for Exploring Dynamic Behaviors in Urban Places". M.Arch, Department of Architecture, University of Washington.  
[http://depts.washington.edu/maushaus/mousePDF/mouse\\_thesis.pdf](http://depts.washington.edu/maushaus/mousePDF/mouse_thesis.pdf).
- Theraulaz, Guy, and Eric Bonabeau. 1995. "Modelling the Collective Building of Complex Architectures in Social Insects with Lattice Swarms." *Journal of Theoretical Biology* 177 (4) (December): 381–400. doi:10.1006/jtbi.1995.0255.
- Timmermans, Harry, ed. 2009. *Pedestrian Behavior: Data Collection and Applications*. 1st ed. Emerald Group Publishing Limited.
- Tomczyk, Aleksandra M., and Marek Ewertowski. 2013. "Planning of Recreational Trails in Protected Areas: Application of Regression Tree Analysis and Geographic Information Systems." *Applied Geography* 40 (June): 129–139. doi:10.1016/j.apgeog.2013.02.004.
- Vidal, José M. 2010. *Fundamentals of Multiagent Systems*. <http://multiagent.com/>.
- Weiss, Gerhard, ed. 2013. *Multiagent Systems*. second edition. The MIT Press.  
<http://www.the-mas-book.info/>.
- Wijermans, Ferdinanda Elfrida Hubertina. 2011. "Understanding Crowd Behaviour: Simulating Situated Individuals". Dissertation, Groningen: University of Groningen.  
<http://irs.ub.rug.nl/ppn/333429745>.
- Zhou, Suiping, Dan Chen, Wentong Cai, Linbo Luo, Malcolm Yoke Hean Low, Feng Tian, Victor Su-Han Tay, Darren Wee Sze Ong, and Benjamin D. Hamilton. 2010. "Crowd Modeling and Simulation Technologies." *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 20 (4) (November): 20:1–20:35. doi:10.1145/1842722.1842725.

## 12 Publicacions ja realitzades en el camp

Queraltó Ros, Pau, and Francesc Valls Dalmau. 2010. "Herramienta de cálculo de rutas óptimas según parámetros de accesibilidad física en itinerarios urbanos." *ACE: architecture, city and environment* 5 (13) (June 25): 161–184.

Valls, Francesc. 2010. "Metodología para la evaluación de rutas óptimas en entornos urbanos a partir de datos de LTS". Masters Research thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2099.1/11696>.

Valls, Francesc, and Josep Roca. 2012. "Quantification of Similarity Between Land Cover Categories." In Rio de Janeiro.