

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

Modelització i simulació d'un sistema urbanístic de ciutat intel·ligent sostenible

MEMÒRIA

30 d'abril de 2019

Autor: Marta Boldú Rubio
Directors: Yolanda Bolea Monte
Convocatòria: 04/2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El present treball consisteix en l'aplicació d'una metodologia científica per tal d'analitzar la sostenibilitat d'un sistema socioecològic.

A causa del gran creixement demogràfic que estan patint les ciutats els darrers anys i davant la previsió de què segueixin augmentant en població, s'ha escollit l'entorn urbà com al sistema dinàmic d'estudi. A més del creixement demogràfic urbà, s'està produint un gran avenç en tecnologia de sensors i autòmats, així com de robòtica, que facilita l'aparició de les anomenades *smart cities*. Aquest canvi de paradigma que s'està instaurant requereix d'eines d'investigació i evaluació adequades que permetin l'assessorament per a fer front a les noves problemàtiques que se'n derivaran. L'ús de tecnologies i la instauració d'aquestes en el nostre dia a dia podria significar una degradació de l'ecosistema i dels seus recursos.

El treball sobretot se centra en l'aspecte ambiental, per a veure com afecten diferents classes de tecnologia, segons si treballen per a millorar l'entorn o si bé, el malmeten i només n'extreuen els béns i serveis. En aquest projecte es desenvolupa un sistema bàsic per a descriure'n la dinàmica, basat en estudis previs en sistemes socioecològics basats en el turisme, començant per la feina de Casagrandi i Rinaldi i ampliat per Lacitignola et al.

Per a la validació, es prenen les dades d'una *smart city* de debò com és Singapur i es desplega el model basat en l'interacció entre tecnologies (T), la qualitat dels béns i serveis de l'ecosistema (E) i el capital (C), entès com a infraestructures i empreses tecnològiques.

En particular, com s'ha dit, el treball farà èmfasi a la interacció entre les dues classes de tecnologies esmentades anteriorment i la del medi ambient. D'aquesta manera, s'exploren escenaris diferents fent referència a la coexistència entre les dues tecnologies i les condicions d'equilibri de les equacions. Finalment, es discuteixen els resultats de la simulació per tal d'arribar a conclusions extrapolables a qualsevol sistema urbà desenvolupat tecnològicament.

Índex

1	Prefaci	5
1.1	Origen del projecte	5
1.2	Requeriments previs	5
2	Introducció	7
2.1	Objectius del projecte	7
2.2	Estat de l'art	7
2.2.1	Sostenibilitat en ciutats	8
2.2.2	L'auge de les <i>smart cities</i>	9
2.2.3	Robòtica a les ciutats	13
2.3	Abast del projecte	16
3	Modelització	17
3.1	Tipus de models	17
3.1.1	Modelització teòrica	17
3.1.2	Identificació	17
3.2	Model senzill. El model de Casagrandi i Rinaldi	18
3.3	Variació del model senzill. El model de Lacitignola et al	19
3.3.1	Dinàmiques dels <i>eco-tourists</i> i els <i>mass-tourists</i>	20
3.3.2	Dinàmiques de la qualitat de l'ecosistema i el capital	22
3.4	Model proposat	24
3.4.1	Tipologia de tecnologia i robòtica per a les <i>smart cities</i>	25
3.4.2	Definició dels paràmetres	29
4	Anàlisi de resultats	31
4.1	Cas d'estudi	31
4.1.1	Definició de paràmetres	32
4.2	Evolució de l'entorn en absència d'interacció amb les altres variables	32
4.3	Absència de producció de tecnologies	33
4.4	Producció de tan sols un tipus de tecnologia	33
4.4.1	Absència de producció de eco-tecnologies i eco-robots	34
4.4.2	Absència de producció de tecnologies de segona classe T_2	34
4.5	Convivència de totes les variables d'estat	34
4.5.1	Dominància de T_1	35
4.5.2	Dominància de T_2	35
4.6	La degradació τ augmenta	36
4.7	Variació en les inversions	36
4.7.1	Cas d'inversió nul·la a les eco-tecnologies $\epsilon_1 = 0$	36
4.7.2	Cas d'inversió nul·la a les eco-tecnologies $\epsilon_2 = 0$	37
5	Pressupost	43
5.1	Cost de personal	43
5.2	Cost de llicències	43
5.3	Cost de material	43
5.4	Cost energètic	43
5.5	Cost total associat	44
6	Impacte ambiental	45

7 Impacte social	47
Conclusions	49
Agraïments	51
Bibliografia	53

Índex de figures

1	Percentatge de població urbana respecte la total Font: Population Reference Bureau	7
2	Creixement de la població urbana. Font: Nacions Unides. Departament d'Economia i Afers Socials.	8
3	Diagrama de venn representatiu de les dimensions estàndards del desenvolupament sostenible. Adaptat de Tanguay, 2009 i fent referència als conceptes proposats al WLED, 1987	9
4	Granja interior vertical	14
5	Robot d'atenció al client a Tòquio	15
6	Interaccions entre les variables d'estat de Casagrandi i Rinaldi	18
7	Interaccions entre les variables d'estat amb tipologies	20
8	Interaccions entre les variables d'estat del model proposat	25
9	Mapa de Singapur	32
10	E sense interacció de variables	33
11	Anàlisi en absència de tecnologies i mostra temporal de 1000 anys	34
12	Anàlisi en absència de tecnologies i mostra temporal de 10 anys	35
13	Anàlisi en absència de T_1 i mostra temporal de 10 anys	36
14	Anàlisi en absència de T_2 i mostra temporal de 10 anys	37
15	Anàlisi en absència de T_2 i mostra temporal de 500 anys	38
16	Dominància inicial de T_1	38
17	Dominància de T_1 partint de condicions inicials de qualitat ambiental superiors	39
18	Convivència de tots les variables amb dominància inicial de T_2	39
19	Incrementant el paràmetre $\tau = 2$ que indica una degradació major dels béns i serveis de l'ecosistema	40
20	Inversió tan sols en T_2 normalitzada	40
21	Inversió tan sols en T_1 normalitzada	41

Índex de taules

1	Taula de paràmetres	30
2	Fitxa de Singapur	32
3	Pressupost del projecte	44

1 Prefaci

1.1 Origen del projecte

Ens trobem en una època de grans canvis: els avenços tecnològics són a l'ordre del dia i modifiquen la realitat i la manera que tenim de relacionar-nos-hi. Les innovacions tecnològiques afecten al nostre entorn i deriven a canvis socials difícils de preveure. Alhora, l'evidència del canvi climàtic s'accentua i és urgent adreçar la problemàtica. Sempre he concebut la tecnologia com una eina per tal de construir un món millor, més habitable per a tothom, on els recursos del planeta no estiguin sobreexplotats i on les necessitats bàsiques de la població mundial estiguin cobertes.

Tenint en compte això, he volgut averiguar com podia servir l'enginyeria i els coneixements apresos durant el grau per a fer front a aquests nous reptes, centrant-me sobretot en la sostenibilitat. Considero la dinàmica de sistemes i la modelització branques de coneixement molt útils i interessants per a descriure la realitat, entendre-la i poder-hi incidir. És per aquest motiu, que humilment he mirat de trobar el nexa que em permetés estudiar-ho.

A més a més, com que la idea de *smart cities* és un tema recurrent i alhora força desconegut que sembla que canviarà el meu entorn més immediat, he mirat d'aprofundir-hi i fer una anàlisi centrant-me en com aquestes transformacions urbanes poden afectar al medi ambient.

1.2 Requeriments previs

Per tal de dur a terme el projecte, és necessari un nivell alt en l'ús de programes com MATLAB i SIMULINK, així com saber manejar grans bases de dades fent servir eines com l'Excel o el MINITAB. Cal, a més, disposar de les llicències corresponents.

Tanmateix, es requereixen coneixements d'equacions diferencials ordinàries, dinàmica de sistemes, alhora que calen també nocions d'estadística i anàlisi de dades.

2 Introducció

2.1 Objectius del projecte

A l'hora de plantejar els horitzons d'aquest treball, s'han fixat els següents objectius:

- Entendre un model dinàmic descriptiu d'un sistema socioeconòmic qualsevol. Concretament, aquest projecte prendrà com a base un model turístic.
- Poder-lo simular amb les eines MATLAB i SIMULINK i entendre'n el comportament.
- Adaptar-lo, modificant-lo o ampliant-lo, per a poder descriure el context d'interès pel treball amb els elements que li corresponen.
- Vincular-lo a un escenari real tancat a través de l'anàlisi de dades.
- Fer simulacions i interpretar-ne els resultats per a poder-ne extreure conclusions.

2.2 Estat de l'art

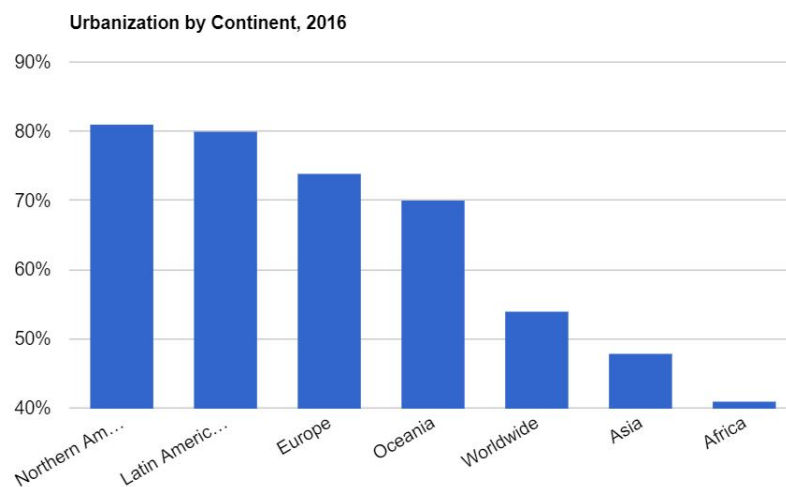


Figura 1: Percentatge de població urbana respecte la total Font: Population Reference Bureau

Les dades són indiscutibles: s'està produint un creixement en l'urbanització i en els moviments migratoris massius cap a les ciutats. Tant les Nacions Unides, el 2009, com l'Organització Internacional de les Migracions, el 2015, van coincidir a estimar que vora 3 milions de persones s'estan mudant a ciutats cada setmana. Aproximadament un 54% de la població mundial viu actualment en ciutats, respecte el 30% dels anys 50. Més de la meitat d'aquests ciutadans, a més, viuen en una de les 1.022 ciutats amb més de mig milió d'habitants. Avui dia n'hi ha 29 amb poblacions superiors als 10 milions (respecte a tan sols 2 que hi havia a la dècada dels 50) i es prediu un creixement d'aquestes fins a ser entre 41 i 53 l'any 2030.

Sumat a això i a causa de la forma que pren l'economia moderna i el capitalisme actual, es

produceix un augment de la concentració de béns i serveis. Amb la riquesa concentrada en llocs concrets, l'atracció cap a aquests punts s'enforteix de manera natural.

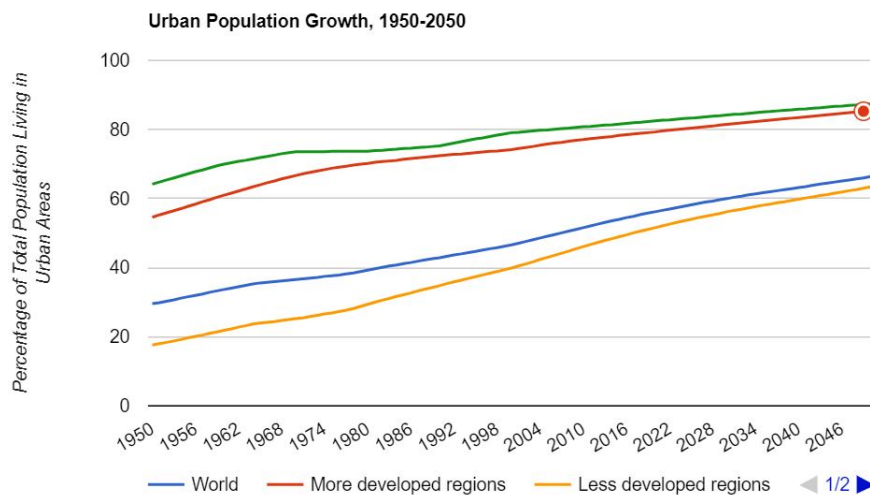


Figura 2: Creixement de la població urbana. Font: Nacions Unides. Departament d'Economia i Afers Socials.

2.2.1 Sostenibilitat en ciutats

Per tal d'entendre el funcionament de la ciutat se sol fer l'analogia d'aquesta com a metabolisme. Un animal converteix el menjar, l'aigua i l'oxigen en energia i residus com poden ser l'orina o el diòxid de carboni. L'energia la fa servir per a respirar, per a moure's, per a pensar o bé l'emmagatzema per si li és necessària més endavant. Aquests processos formen part del seu metabolisme: per tal de sobreviure i funcionar necessita energia i genera residus. D'una manera molt similar, doncs, les ciutats necessiten energia, materials, aigua i nutrients per a proveir subsistència i sostre als seus habitants, com també béns i serveis per a créixer i per a eliminar els residus i la contaminació. I així com el metabolisme d'un animal és el resultat de la cooperació entre cervell, òrgans i enzims, les polítiques governamentals, la infraestructura i els ciutadans fan funcionar el metabolisme urbà.

Donat l'augment del moviment migratori cap als nuclis urbans, la demanda creix i les ciutats s'han d'adaptar. En conseqüència, també s'incrementen els residus. Malauradament, això implica que tot i que els sistemes urbans depenen dels béns i serveis proporcionats per l'ecosistema a fi de prosperar, simultàniament ells mateixos amenacen l'ecosistema del que depenen a base d'anar fent ús dels recursos, d'invadir el terreny i generar contaminació.

Tenint això en compte, el gran repte actual per les ciutats és, doncs, gestionar la forta dependència que es té als béns i serveis de l'ecosistema per tal que això no derivi a l'exhauriment dels recursos naturals i de la biodiversitat. És una doble dificultat ja que es tracta de combatre els efectes del canvi climàtic sense que això repercuteixi a la qualitat de vida de les persones i sense oblidar-nos de drets socials com l'accés a una sanitat pública o a l'ensenyament.

Segons *Kennedy et al (2007)*, una ciutat sostenible només pot ser la que té un flux de material i energia i de disposició de residus que no excedeixi a la capacitat del seu entorn. Per tal de mesurar i evaluar la sostenibilitat d'una ciutat cal comptar amb factors socials, econòmics, mediambientals i governamentals. Una ciutat amb aquestes variables d'estat en equilibri es pot donar si les ciutats disposen de bons sistemes de disposició dels residus, d'espais verds, de transport públic, de ciutadans que mantenen un estil de vida sostenible. Però no només això és suficient: cal també que la ciutat redueixi el consum de recursos naturals i la seva petjada ecològica, que hi hagi un bon aprofitament del sòl. I fins i tot així també s'ha de tenir en compte de quina manera aquests recursos arriben a la ciutat, quina distància es troben les granges que proporcionen l'aliment pels ciutadans, amb quin mitjà de transport es mouen els materials i les mercaderies, si l'accés a l'aigua està garantit o cal bombejar-la des d'una zona inferior per tal que arribi a les llars dels ciutadans, etc.

Totes aquestes consideracions són importants, però fan de molt mal mesurar, ja que hi interveuen un munt de variables. Malgrat això, hi ha un consens general per a il·lustrar en un diagrama de venn l'aspecte econòmic, social i ecològic que ens serveix per a descriure la sostenibilitat.

A partir d'aquí, s'han fet multitud d'estudis per a trobar indicadors fiables i es poden trobar diverses eines de mesura. A més a més, s'han fet estudis particulars i cadascun s'ha centrat en un aspecte concret que ajuda a enriquir el debat general i sumar coneixement al coneixement.



Figura 3: Diagrama de venn representatiu de les dimensions estàndards del desenvolupament sostenible. Adaptat de Tanguay, 2009 i fent referència als conceptes proposats al WLED, 1987

2.2.2 L'auge de les *smart cities*

En part com a resposta al creixement demogràfic urbà i en part de la mà de la revolució tecnològica contínua que s'ha esdevingut durant els darrers anys, neix el concepte de ciutat intel·ligent.

Malgrat ser un concepte en voga, hi ha cert debat a l'hora de definir-la i acotar-ne les característiques. En la seva forma més bàsica i senzilla, la ciutat intel·ligent es pot definir com a una àrea urbana que es dota de mecanismes basats en les tecnologies de la societat de la informació i comunicació per tal de gestionar els seus actius i recursos de manera eficient. El concepte es difón sovint mitjançant la seva forma anglesa *smart city*.

El debat sorgeix a l'hora d'enfocar la manera en què s'han d'aprofitar els recursos particulars de cada indret i què es vol potenciar mitjançant aquests. Cal, a més, tenir en compte que és una denominació que es fa servir com a reclam comercial per part d'empreses i ciutats, per tant el seu ús nominal no acostuma a ser innocent.

A nivell polític, s'està adreçant precisament el debat en el paper que han d'agafar les infraestructures de les TIC. No sols aquesta qüestió està sobre la taula, sinó també s'està començant a insistir cada cop més en la recerca sobre el rol que juga el capital humà i l'educació, així com també hi ha un interès creixent en la preservació del medi ambient com un dels motors més importants del creixement urbà.

De fet, la Unió Europea centra esforços constants per a elaborar i establir una estratègia per tal d'aconseguir un creixement urbà en un sentit intel·ligent per les ciutats que la componen, ja siguin metropolitanes o regionals. Diverses associacions i institucions internacionals també treballen en aquesta direcció amb l'objectiu de crear un marc d'anàlisi comú i complet.

Com s'ha comentat anteriorment, és un concepte susceptible a l'instrumentalització. Distingirem els tres enfocaments diferents més usuals:

- **El desenvolupament d'infraestructures**

Aquest prisma s'usa per a parlar de la "utilització de les infraestructures en xarxa per a millorar l'eficiència econòmica i política, tot permetent el desenvolupament social, cultural i urbà". Des d'aquest punt de vista, es comprèn com a infraestructures tots els serveis empresarials, habitatges, serveis d'oci, les TIC, posant l'èmfasi sobretot en la idea d'una ciutat cablejada com a model principal de creixement i desenvolupament. Se subratlla el paper crític exercit per les indústries creatives i l'orientació de les empreses en atraure la creativitat. En aquesta direcció, malgrat que la presència d'una força de treball creativa i qualificada no és cap garantia del desenvolupament d'una ciutat, en una economia com la nostra, cada vegada més globalitzada i de coneixement intensiu i especialitzat, aquests factors guanyen pes a l'hora de determinar l'èxit de les ciutats.

- **La creació d'un ecosistema competitiu**

Amb un objectiu similar al del primer enfocament, en aquest segon cas es posa el focus en aprofitar les oportunitats generades per les TIC per a augmentar la prosperitat i competitivitat locals. D'aquesta manera, es busquen ciutats orientades en posar l'accent en el desenvolupament urbà centrat en les empreses. Tot se centra en l'atracció de nous negocis per tal d'obtenir millors resultats socioeconòmics. Amb aquesta fi, es dissenyen parcs empresarials com els que hi ha, per exemple, a Kochi, Malta o Dubai.

La capacitat de la intel·ligència local també en aquest cas va molt lligada a l'economia basada en el coneixement. Les principals fonts de creixement són la innovació i la intel·ligència col·lectiva de la comunitat. En resum, es posa al centre la innovació, la creació de xarxes de coneixement amb l'objectiu d'atreure negoci i crear beneficis.

- **L'òptica sostenible i les ciutats inclusives**

Alternativament, trobem un tercer enfocament que posa el focus sobre la sostenibilitat com a component estratègic fonamental per a la creació d'una *smart city*. Distingim la sostenibilitat social i la mediambiental. El canvi cap a la primera inclou la integració de tècniques d'e-participació, com per exemple la consulta en línia o la deliberació sobre els canvis de servei. S'encara el factor de la participació ciutadana en la democratització de les decisions adoptades sobre les decisions preses en l'àmbit urbà. La sostenibilitat mediambiental apareix en aquest enfocament alternatiu, posant l'accent en l'escassetat de recursos. Es considera que les ciutats basen cada vegada més el seu desenvolupament i la seva riquesa en els recursos turístics i naturals (Barcelona n'és un exemple clar). Per tant, l'explotació d'aquests recursos que ajuden a fer prosperar la ciutat ha de garantir l'ús segur i renovable del patrimoni cultural i ecològic. D'aquí se n'extreu la importància de preservar les infraestructures de la ciutat així com també de l'entorn natural.

En la mateixa direcció, s'entén que la gent ha de ser capaç de fer servir la tecnologia per tal de beneficiar-se'n. Si no es fa de manera intel·ligent, pot sorgir com a resultat una polarització social i es poden acusar encara més les desigualtats de classe dins d'un mateix entorn urbà.

En resum, aquesta visió considera que l'única ciutat intel·ligent que pot ser denominada com a tal és aquella que té en compte l'aspecte de la sostenibilitat social i mediambiental. La resta, són meres ciutats digitals.

Exemples de *smart cities*

Hi ha exemples de *smart cities* arreu del món. A continuació, se n'exposa una mostra per a il·lustrar i exemplificar l'aplicació de les tecnologies en escenaris reals.

En primer lloc, a Àmsterdam trobem *The Amsterdam smart city initiative*, que comença el 2009 i que avui dia inclou més de 170 projectes que estan desenvolupats col·laborativament amb els residents locals, govern i empresa. Aquests projectes s'executen en una plataforma interconnectada a partir de xarxes sense fils per a millorar la capacitat instantània de presa de decisions de la ciutat. La ciutat d'Àmsterdam argumenta que el propòsit del projecte es basa en reduir el trànsit, estalviar energia i millorar la seguretat pública. Per promoure que els residents locals hi posin de la seva part, la ciutat organitza un premi anual a la millor iniciativa que s'adapti al marc de treball. Un exemple és l'app *Mobypark*, que permet el lloguer de places de pàrquing als seus propietaris. A més, a partir de les dades generades per l'app se n'extreu la informació necessària per a determinar la demanda de places de pàrquing i els fluxos de trànsit dins d'Àmsterdam. Multitud de llars també estan provistes de comptadors d'energia intel·ligents amb incentius per reduir activament el consum d'energia. Altres iniciatives inclouen il·luminació flexible, que dona el control a les municipalitats de la lluminositat dels fanals i de la gestió dels llums de trànsit, on el trànsit està monitoritzat en temps real a través de les tecnologies de la informació, mentre proporciona aquesta informació als usuaris per a què tinguin més eines per decidir quina és la millor ruta.

En segon lloc, Barcelona també compta amb un número de projectes que la permet considerar-se una *smart city*. Aquests s'engloben dins l'estratègia de "CityOS". Per exemple, la tecnologia de sensors s'ha implantat en el sistema de reg al Parc del Centre de Poblenou, on es transmeten les dades a temps real als equips de jardineria segons els nivells d'aigua que necessiten les plantes. També Barcelona ha dissenyat la xarxa d'autobusos basada en l'anàlisi de dades del flux de trànsit més habitual a Barcelona, fent servir principalment rutes verticals, horitzontals i diago-

nals amb una xarxa d'intercanvis i transbords. La integració de tecnologies de ciutat intel·ligent també es poden veure en la incorporació de llums de trànsit intel·ligent, ja que els autobusos precisament circulen per rutes per tal d'aprofitar els semàfors verds. A més, quan s'avisava d'una emergència a Barcelona, la ruta aproximada del vehicle que la cobreix s'entra dins del sistema de llums de trànsit, posant tots els semàfors en verd a mida que el vehicle s'hi aproxima. Això es fa gràcies a una mescla de software de gestió de trànsit i GPS, permetent d'aquesta manera als serveis d'emergència arribar al lloc de l'incident sense retard. La major part d'aquestes dades les gestiona la Sentilo Platform, un software lliure de sensors i actuadors.

Un altre exemple és una ciutat molt diferent com Dubai. El 2013, el projecte Smart Dubai fou iniciat per Shaikh Mohammad bin Rashid Al Maktoum, vicepresident de la UAE. El projecte contenia més de 100 iniciatives que preveien fer de Dubai una ciutat intel·ligent cap el 2030. Tenia l'objectiu d'integrar sectors privats i públics, donant accés als ciutadans a través dels seus smartphones. Algunes iniciatives inclouen l'Estratègia de Transportament Autònom per a crear una xarxa de trànsit sense conductors. L'any 2021 es vol tenir digitalitzada per complet la informació del govern, dels negocis i dels clients i transaccions, proporcionant als habitants 5000 punts d'accés a les aplicacions del govern. *mPay* i *DubaiNow* són dos exemples d'aplicacions que faciliten serveis de pagament per ciutadans: des de serveis públics o multes de trànsit fins a serveis d'educació, salut, transport i comercials. A més a més, la *Smart Nol Card* és una targeta recarregable que permet al ciutadà pagar qualsevol servei de transport com ara el metro, l'autobús, el taxi, etc. Una altra iniciativa a Dubai és la *Dubai Municipality's Digital City* que assigna cada edifici un codi QR únic l'escanejat del qual conté informació de l'edifici, el solar i la localització.

Per altra banda, a Madrid podem trobar més exemples de tecnologies intel·ligent adaptades en el seu entorn urbà. *MiNT Madrid Inteligente* és una plataforma que integra la gestió de serveis locals. Aquest inclouen una gestió sostenible i computaritzada de la gestió de la infraestructura, de la recollida d'escombreries i el reciclatge, i dels espais públics i àrees verdes, entre d'altres. El programa es porta a terme de la mà de INSA de IBM, aprofitant-se de l'experiència i capacitat que tenen en l'anàlisi de Big Data.

Finalment, a Estocolm trobem altres iniciatives interessants, com ara l'estratègia *Green IT*. Aquest programa pretén reduir l'impacte mediambiental de la ciutat fent servir funcions TIC com ara l'eficiència energètica en edificis (minimitzant els costos de calefacció), monitoratge del trànsit (minimitzant el temps de circulació), el desenvolupament de serveis electrònics (minimitzant l'ús del paper), etc.

Crítiques i problemàtiques

La crítica a les *smart cities* gira al voltant de:

- S'usa com una argumentació estratègica per a ignorar vies alternatives de desenvolupament urbà que podrien ser més òptimes i prometedores.
- Una ciutat intel·ligent, entesa com una ciutat científicament planejada, desafiaria el fet que el desenvolupament real de ciutats sovint és atzarós. En aquesta línia, es percep la *smart city* com a poc atractiva pels ciutadans ja que aquestes poden ensopir i idiotitzar la gent que hi viu en el seu bressol de la màxima eficiència. En comptes, la gent preferiria les ciutats en les que poden participar per a donar-los forma.

- Posar el focus al concepte de *smart city* podria derivar a una subestimació dels efectes negatius possibles de noves xarxes tecnològiques infraestructurals que necessita la ciutat per a ser intel·ligent.
- La idea d'espais urbans neo-liberal ha estat criticada pels riscos potencials associats en posar un pes excessiu en els valors econòmics com a únic fil conductor pel desenvolupament urbà. Entre els seus patrons de desenvolupament cal que els responsables polítics considerin també tots aquelles que no depenen només d'un model basat en els negocis.
- Com que el model de negocis globalitzat es basa en la mobilitat del capital, seguir un model sols orientat en la creació de riquesa podria resultar en una estratègia de pèrdues a llarg termini. És a dir, si el capital es mou segons la oportunitat que tingui d'obtenir un tracte millor, realment no es pot considerar riquesa vinculada a la ciutat. Això és tan cert per a una *smart city* com ho fou per la ciutat industrial.
- El grau elevat de col·leccions de big data i anàlisi ha despertat preguntes relacionades amb la vigilància i el control de la població, particularment ja que es relaciona amb la política de predicció i prevenció.
- Des de l'agost del 2018, la discussió sobre *smart cities* se centra en l'ús i l'implementació de la tecnologia més enllà de com els habitants de les ciutats poden estar implicats en el procés.
- Especialment, en els països amb menys ingressos, les ciutats intel·ligents són irrellevants per a la majoria de la població urbana. Si es focalitza l'atenció en el concepte, la situació de desigualtat i marginalització podria empitjorar.
- Si l'estratègia de la ciutat intel·ligent es traça sense tenir en consideració la gent amb problemes d'accessibilitat, com ara persones amb diversitat funcional de mobilitat, visió, oïda i cognitiva, la implementació de noves tecnologies podrien crear tan sols més impediments per a aquests sectors de la població.

2.2.3 Robòtica a les ciutats

Afegit a tot això, la robòtica s'està obrint pas també en el terreny de l'urbanisme i és un aspecte més a tenir en compte i a estudiar. Els robots que ja existeixen al nostre món, segueixen sent encara força disfuncionals, tot i que s'estan constantment infiltrant en àrees urbanes al voltant del món. Aquesta quarta revolució industrial encapçalada per la robòtica està també configurant els espais urbans i la vida urbana en resposta als reptes i oportunitats econòmiques, socials, polítiques i de salut. Hi ha la tesi que les nostres ciutats s'estan fent massa grans per a ser gestionades només per humans.

Els problemes són els mateixos que ja s'han plantejat en anteriors apartats i una nova proposta per a afegir a la solució d'aquests és la solució robòtica.

Els últims cinc anys, governs estatals han començat a mirar-se l'automàtica com la clau per a obtenir millors característiques urbanes. Moltes ciutats s'estan convertint en espais per testejar amb els robots en espais socials, on els robots tenen un propòsit tant pràctic (facilitar la vida



Figura 4: Granja interior vertical

quotidiana) com simbòlic (demostrar bones pràctiques de govern). Tant si és per mitjà de cotxes autònoms, robots de servei a botigues o drons autònoms entregant paquets, les ciutats s'estan automatitzant a marxes forçades.

Grans ciutats com ara Seül, Tòquio, Singapur, Dubai, Londres o San Francisco, serveixen per a escenaris de prova per a processos de conducció autònoma de vehicles. Ports i magatzems automatitzats també se sumen a la tendència. També ens trobem amb sistemes de control automàtic ajuden a regular el trànsit, com s'ha vist en l'exemplificació de *smart cities* de l'apartat anterior. Tanmateix, les granges verticals automatitzades constitueixen una gran innovació a l'hora de la producció del menjar a àrees urbanes no agràries. En fi, la robòtica s'obre pas als espais comercials i urbans, ja sigui en forma d'agents de policia o de cambrers.

Tots aquests exemples mostren de quina manera s'està imposant l'automatització urbana, encara que alguns s'estiguin implantant amb més rapidesa que d'altres. Com predirem els efectes que tindran sobre les nostres societats és una qüestió que no fa massa que s'ha posat sobre la taula. Només una mirada àmplia ens permet evaluar la realitat. Tòquio, Dubai i Singapur són tres exemples que ajuden a il·luminar la qüestió.

Tòquio

La ciutat que acollirà els Jocs Olímpics del 2020 també planeja fer servir l'esdeveniment com a aparador de les noves tecnologies robòtiques. Tòquio s'està convertint en un laboratori de vida urbana. La institució al càrrec és la *Robot Revolution Realisation Council*, fundada el 2014 pel govern nipó.

Els objectius principals de la robotització japonesa són la revitalització de l'economia, fer marca cultural i una demostració internacional. La visió del govern japonès per les Olimpíades inclou a taxis robots transportant els turistes, cadires de rodes intel·ligents que rebin els paralímpics a l'aeroport, robots de servei atenent els clients en més de 20 llengües, etc.

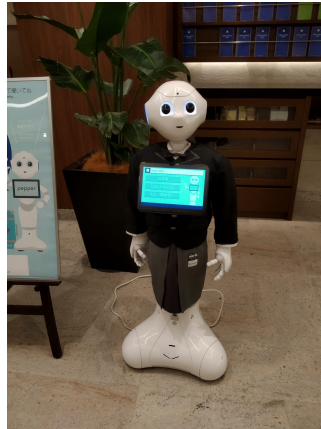


Figura 5: Robot d'atenció al client a Tòquio

Podem prendre Tòquio com a referència del procés de creació per part de l'Estat d'una ciutat robòtica.

Singapur

Singapur, per altra banda, pertany a la categoria de *smart city*, que podria haver estat inclosa a les exemplificacions de l'apartat anterior. El seu govern està experimentant amb els robots amb un objectiu diferent: com a extensions físiques de sistemes ja existents per tal de millorar l'administració, gestió i control de la ciutat.

A Singapur, la narrativa nacional tecno-futurística concep als robots i als sistemes automatitzats com una extensió "natural" del sistema ubrà intel·ligent ja existent. Aquesta visió es desplega per mitjà de robots d'entrega (drons) i autobusos autoconduïts.

Mentrestant, els hotels de Singapur contracten robots de servei subsidiats per l'estat per la neteja d'habitacions. Alhora, robots pilot per l'ensenyament de la infantesa s'estan utilitzant per a entendre com aquests poden ser utilitzats en un futur i els àmbits de la salut i la seguretat social són també àrees d'experimentació a Singapur i a arreu.

Dubai

Exemplificada també com a *smart city*, Dubai també compta amb el doble joc i és un prototip emergent de ciutat intel·ligent controlada per l'estat. Però en comptes de considerar la robotització simplement com una manera de millorar els sistemes ja en funcionament, Dubai està robotitzant els serveis públics amb la intenció de crear l'la ciutat més feliç de la Terra". L'experimentació de la robòtica urbana allà revela que el règim autoritari està trobant maneres de fer servir robots en espais públics, en el transport i en la vigilància.

Els governs estatals competeixen entre ells per a posicionar-se a l'escenari politico-econòmic a través de la robòtica i també estan començant a posicionar-se com a líders regionals. Aquesta era la idea rere la prova del taxi volador del Setembre del 2017, tecnologia desenvolupada per la firma de drons alemanya Volocopter. L'objectiu de Dubai és automatitzar la quarta pert del

seu servei de transport per l'any 2030.

També es troba actualment en fase d'experimentació amb la companyia PAL de robòtica amb seu a Barcelona per un oficial de policia amb forma humanoide. Si els experiments tenen èxit, el govern anunciarà que robotitzarà la quarta part de la força policial per l'any 2030.

Sembla doncs que la robòtica ja no pertany al camp de la imaginació i al cinematogràfic, sinó que ens trobem amb robots reals que ens faran repensar la realitat i les vides urbanes.

Aquests tres laboratoris vivents de robòtica - Tòquio, Singapur, Dubai- ens ajuden a calibrar quin tipus de futur s'està creant i per qui. Des de l'hiper-robotització de Tòquio fins a la de Singapur més intel·ligent i la Dubai feliç i lliure de crims, aquestes tres comparacions ens mostren que, sense importar el context, els robots es perceben com a mitjants per a assolir futurs globals basats en la imaginació nacional, el rol que tindrà el sector privat i el públic en la configuració d'aquest nou món.

2.3 Abast del projecte

L'anàlisi feta en el següent treball se cenyeix a l'efecte d'aquestes noves tecnologies -tant les que pertanyen més a la robòtica com les que es poden veure incloses més aviat a la categoria de les TIC- el medi ambient en un sistema urbà tancat, tenint també en compte la interacció entre una darrera variable d'estat, el capital entès com les infraestructures i empreses tecnològiques. Això permet tenir una anàlisi molt més acotada i desgranada, fent èmfasi a l'objecte principal de tecnologia sostenible. Tot i això, cal remarcar que les variables d'estat no estan capacitades per a reflectir cada aspecte cultural, social i polític d'una ciutat. Els models on hi intervé un factor social són molt més complexos i difícils de predir que els científics i es fan aproximacions.

Aquest projecte, doncs, es limita a dissenyar un model dinàmic i a fer-ne l'anàlisi corresponent.

3 Modelització

3.1 Tipus de models

Al llarg de la història, la humanitat sempre ha mirat de controlar els diferents camps de la ciència i la tècnica construint models de la realitat. La modelització neix amb l'objectiu de comprendre processos i fenòmens d'alta complexitat, poder-ne fer prediccions futures i fins i tot incidir-hi segons es desitgi.

La feina de l'enginyer, cada vegada consisteix més a realitzar models matemàtics dels processos estudiats. Aquests models s'obtenen a través de lleis físiques (modelització teòrica), a partir de dades experimentals (identificació o modelització empírica), o bé combinant ambdós elements (modelització híbrida).

3.1.1 Modelització teòrica

La modelització teòrica es realitza mitjançant els passos següents:

1. Definir sistema, escollint les variables d'entrada i sortida que interessin.
2. Formular les lleis físiques que regeixen el comportament del sistema dinàmic i realitzar les hipòtesis convenients.
3. Escriure les equacions que descriuen el model.
4. Resoldre les equacions per les variables de sortida desitjades.
5. Examinar les solucions i les suposicions fetes.
6. Si és necessari, reanalitzar i redissenyar el sistema.

3.1.2 Identificació

De la mateixa manera, per la identificació cal seguir els següents passos:

1. Planificar els experiments.
2. Seleccionar l'estructura del model.
3. Fer l'estimació dels paràmetres.
4. Verificar el model.

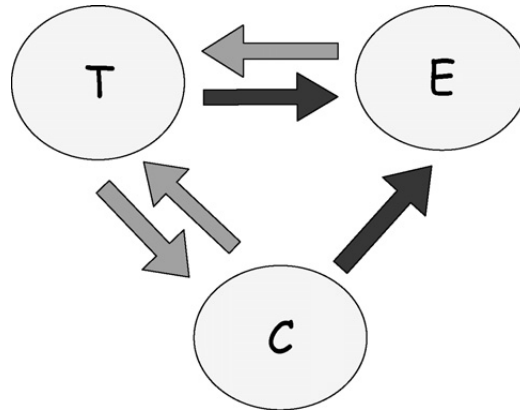


Figura 6: Interaccions entre les variables d'estat de Casagrandi i Rinaldi

3.2 Model senzill. El model de Casagrandi i Rinaldi

Casagrandi i Rinaldi (2002) fan una proposta de mínims per a un model teòric que, tot i ser massa abstracte per a un cas d'estudi real, incorpora certes característiques fonamentals comunes en tots els sistemes socioecològics. En aquest projecte, prenem aquest model com l'inicial, sobre el qual construïrem les variacions convenientes segons els nous requeriments.

Aquest primer model fa referència a un lloc turístic genèric i en descriu la interacció entre les tres variables d'estat: els turistes $T(t)$ presents a l'àrea d'estudi en el temps t ; la qualitat de l'entorn natural $E(t)$; i el capital $C(t)$ entès com les infraestructures per l'allotjament i l'entreteniment destinats als turistes.

La dinàmica dels turistes $T(t)$ es descriu proporcionalment a l'atractiu relatiu del lloc turístic, que se suposa com la diferència entre l'atractiu absolut $a(T, E, C)$ del lloc en qüestió i l'atractiu esperat d'un lloc genèric. Concretament, a és considerat com un valor de referència i pot ser concebut com una mesura de competició entre cadascun dels llocs turístics alternatius de la regió. Per altra banda, l'atractiu absolut $\hat{a}(T, E, C)$ es considera com la suma algebraica de 3 termes: l'atractiu relatiu a la qualitat de l'entorn i el medi ambient $a_E(T, E, C)$, l'atractiu associat a l'infraestructura $a_C(T, E, C)$, l'atractiu lligat a l'aglomeració $a_T(T, E, C)$. Per tant:

$$\frac{dT}{dt} = T(\hat{a}(T, E, C) - a)$$

amb:

$$\hat{a}(T, E, C) = a_E(T, E, C) + a_C(T, E, C) + a_T(T, E, C)$$

a_E i a_C estan modelats com a funcions de Monod, tant per la qualitat de l'entorn E com per les instal·lacions per càpita $C/(T+1)$. En canvi, el terme a_T es considera linealment decreixent proporcionalment a la congestió turística T .

Així doncs, la dinàmica del turisme ve donada per:

$$\frac{dT}{dt} = T \left(\frac{\mu_E E}{E + \varphi_E} + \mu_C \frac{C/(T+1)}{C/(T+1) + \varphi_C} - \alpha T - a \right)$$

La dinàmica de la qualitat de l'entorn $E(t)$ s'assigna com a:

$$\frac{dE}{dt} = rE \left(1 - \frac{E}{k} \right) - E(\beta C + \gamma T)$$

La interacció amb el turisme i amb el capital influeixen negativament sobre la qualitat del medi ambient. És a dir $-E(\beta C + \gamma T)$. Finalment, la dinàmica del capital $C(t)$ està definida per la diferència entre el flux d'inversió i el flux d'amortització.

$$\frac{dC}{dt} = -\delta C + \epsilon T$$

D'aquesta manera, el model de Casagrandi i Rinaldi queda finalment definit pel següent sistema dinàmic no lineal de 3 dimensions:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= T \left(\frac{\mu_E E}{E + \varphi_E} + \mu_C \frac{C/(T+1)}{C/(T+1) + \varphi_C} - \alpha T - a \right) \\ \frac{dE}{dt} &= rE \left(1 - \frac{E}{k} \right) - E(\beta C + \gamma T) \\ \frac{dC}{dt} &= -\delta C + \epsilon T \end{aligned} \quad (1)$$

on tots els paràmetres implicats són constants positives. En particular, els paràmetres $\mu_e, \varphi_e, \mu_c, \varphi_c, \alpha, a$ caracteritzen els turistes; r, k, β, γ caracteritzen la qualitat de l'entorn, d està relacionat amb la degradació de les infraestructures turístiques. Es dona una importància especial al paràmetre a , és a dir, a l'atractiu esperat del lloc turístic, i al paràmetre ϵ , indicador d'una política d'inversió; ambdós es consideren paràmetres bifurcadors.

La noció de sostenibilitat del model va estretament lligada a les propietats estructurals dels atractors del sistema dinàmic. Aquest aspecte ha estat ampliat i implementat al model de *Casagrandi i Rinaldi (2004)*.

Al *Casagrandi i Rinaldi (2002)*, s'efectua una anàlisi detallada del model, proveïnt resultats teòrics que coincideixen amb les observacions i coneixements convencionals. Malgrat això, tal i com els autors reconeixen, les tres variables d'estat no estan capacitades per a transmetre i reflectir cada aspecte cultural, social i polític que intervé en les dinàmiques del turisme. A més a més, suggereixen que el model podria ser millorat per tal d'incloure atributs i característiques turístiques més realistes.

3.3 Variació del model senzill. El model de Lacitignola et al

Pel model avançat, prenem com a referència un segon model que es basa en el primer. De manera similar al *Casagrandi i Rinaldi (2002)*, els autors de l'article *Modelling socio-ecological tourism-based systems for sustainability* consideren els turistes T , la qualitat del medi ambient E i el capital C com a variables d'estat pel seu model, però introdueixen, com a novetat, la distinció dels turistes T en dues tipologies diferents: els anomenats *eco-tourists* (traduïbles com a eco-turistes) $T1$, i els *mass-tourists* $T2$ que representen el turisme de massa. Ho fan d'aquesta manera per tal de diferenciar els aspectes motivacionals subjacents i les relacions que estableixen amb l'entorn, l'allotjament i les instal·lacions destinades amb l'entreteniment.

Tanmateix, *Lacitignola et al (2007)* aporten una nova definició i, en consegüent, un nou patró

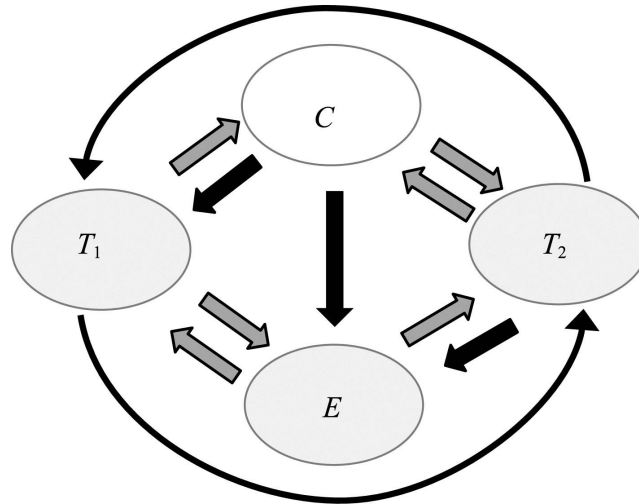


Figura 7: Interaccions entre les variables d'estat amb tipologies

dinàmic per la determinació de la qualitat de l'entorn basat en proves àmpliament reconegudes de la imparable degradació de la qualitat dels béns i serveis de l'ecosistema, components bàsics de qualitat d'un ecosistema.

Un altre aspecte considerable que diferencia el model pr és la manera en com defineixen i fan servir l'atractiu, que és concebut de manera diferent segons la tipologia del turista. Articles teòrics i experimentals en la literatura proporcionen proves de la importància del paper que juguen aquestes diferents tipologies de turistes en la configuració de les destinacions turístiques i els resorts.

3.3.1 Dinàmiques dels *eco-tourists* i els *mass-tourists*

Pel que fa a la dinàmica del turisme ecològic i el de massa, en aquest nou cas se segueix qualitativament la filosofia de Casagrandi i Rinaldi. De fet, s'assumeix que, per ambdues classes de turistes, la taxa de canvi és proporcional al tipus d'atractiu \hat{A} . De manera que podem escriure:

$$\frac{dT_i}{dt} = \hat{A}_i(T_1, T_2, E, C) T_i, \quad i = 1, 2$$

Particularment, \hat{A}_i és un atractiu relatiu, entès com la diferència l'atractiu absolut A_i del lloc turístic concret i un valor de referència w_i que indica la seva degradació. Per tant:

$$\frac{dT_i}{dt} = \{A_i(T_1, T_2, E, C) - w_i\} T_i, \quad i = 1, 2$$

Precisant, l'atractiu absolut $\hat{A}_i(T_1, T_2, E, C)$ és l'encant que proporciona la qualitat de l'ecosistema, l'allotjament i les instal·lacions d'entreteniment, i l'aglomeració que té el lloc concret i pot ser llavors considerada com a la suma d'aquests tres factors: l'atractiu de l'entorn a_E , les instal·lacions i infraestructures per a l'allotjament i l'entreteniment a_C , l'aglomeració a_T .

Cal remarcar la diferència entre aquest cas i el cas original de Casagrandi i Rinaldi, ja que en

aquest model l'atractiu és funció de les dues tipologies de turista. D'aquí:

$$A_i(T_1, T_2, E, C) = a_{iE}(T_1, T_2, E, C) + a_{iC}(T_1, T_2, E, C) + a_{iT}(T_1, T_2, E, C)$$

El paràmetre w_i és considerat un coeficient de degradació que pot ser influenciat per una gran varietat de factors, objectius i subjectius, com ara la degradació dels béns i serveis de la destinació turística així com la comparació amb el reclam potencial que poden tenir destinacions turístiques alternatives. La forma funcional dels termes relatius als resultats de l'atractiu, doncs, estan estretament connectats a les peculiaritats de les tipologies turístiques.

Se suposa l'atractiu a_E relacionat amb la qualitat de l'ecosistema, de tal forma que:

$$a_{iE}(T_1, T_2, E, C) = a_{iE}(E), \quad i = 1, 2$$

L'*eco-tourist* T_1 està descrit com una mena de turista amb consciència sobre la qualitat dels ecosistemes, de tal forma que quan aquesta és alta, el lloc turístic generarà gran interès per aquest tipus de turista, mentre que si la qualitat de l'entorn del lloc turístic minva per sota un cert límit es veurà dissuadit de visitar aquest lloc. L'atractiu mediambiental a_{1E} està definit tenint en compte l'apreciació prèvia amb una resposta funcional del tipus III:

$$a_{1E}(E) = \frac{\mu_{1E}E^2}{E^2 + \varphi_{1E}^2}$$

Alhora, el *mass-tourist* T_2 també cerca una certa qualitat de l'ecosistema, però tendeix a explotar els béns i serveis de l'entorn sense tenir en compte el seu nivell de qualitat, de tal manera que no hi ha resposta delimitant. L'atractiu mediambiental a_{2E} aquest cas queda definit per la funció Monod de E :

$$a_{2E}(E) = \frac{\mu_{2E}E}{E + \varphi_{2E}}$$

De manera similar, basat en la resposta esperada de les dues classes de turistes a l'allotjament i l'infraestructura per a l'entreteniment, a_{1C} es converteix en:

$$a_{iC}(T_1, T_2, E, C) = a_{iC}(T_1, T_2, C), \quad i = 1, 2$$

L'*eco-tourist*, per definició, no se sent atret pel número absolut d'allotjaments i infraestructures turístiques disponibles en un lloc, preferint doncs la naturalesa, la flora i la fauna. Encara que els eco-turistes necessitin una oferta mínima (límit) per tal de satisfer les seves necessitats, per a diferenciar millor les necessitats entre aquest i les del turista massiu, assumeixen en la primera aproximació, que l'atractiu disminueix per l'eco-turista en tant que creix el número d'infraestructures per càpita. Per tant:

$$a_{1C}(T_1, T_2, C) = -\beta_1 \frac{C}{T_1 + T_2 + 1}$$

Per contra, el turisme massiu busca activament allotjament, infraestructures específiques: s'assumeix un atractiu a_{2C} donat per una funció Monod creixent i de saturació de les instal·lacions per càpita disponibles al lloc turístic estudiat. És raonable pensar-ho així ja que el capital C està

representat per inversions de la indústria de l'entreteniment com, per exemple hotels, piscines, discoteques prou abundants per tal d'atraure el *mass-tourist* sense excedir un cert límit. D'aquí:

$$a_{2C}(T_1, T_2, C) = \mu_{2C} \frac{C/(T_1 + T_2 + 1)}{C/(T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{2C}}$$

L'atractiu a_{1T} està lligat a l'aglomeració i és funció tan sols de les classes turístiques:

$$a_{iT}(T_1, T_2, E, C) = a_{iT}(T_1, T_2), \quad i = 1, 2$$

Respecte els *eco-tourists* T_1 :

$$a_{1T}(T_1, T_2) = -\alpha_1 T_1 - \alpha_1^* T_2 - \gamma_1^* T_1 T_2$$

Els primers dos termes indiquen la pèrdua d'atractiu a causa de la presència de turistes del seu mateix tipus ($-\alpha_1 T_1$), o bé per turistes de massa ($-\alpha_1^* T_2$), mentre que el terme $-\gamma_1^* T_1 T_2$ és la pèrdua d'atractiu segons el turista ecologista degut a un tipus d'inhibició causat per la presència del turisme de massa. Aquesta pèrdua està considerada proporcional al número de trobades entre les dues classes de turista. El terme referent a la inhibició inclou qualsevol tipus de condició externa (per exemple sorolls, etc) provocats per l'interacció dels turistes T_2 que poden anar en detriment dels turistes T_1 fent servir els mateixos recursos.

De la mateixa manera, pel turista de masses T_2 , consideren:

$$a_{2T}(T_1, T_2) = -\alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1 - \gamma_2^* T_1 T_2$$

L'atractiu a_{iT} està modelat de la mateixa manera per ambdues classes i se'ls considera a ambdues susceptibles a veure's afectades per l'aglomeració. Els valors diferents assumits pels paràmetres indiquen com cada tipus de turista es veurà afectat per tal mecanisme proporcionant una distinció clara entre classes de turista.

$$\frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{\mu_{1E} E^2}{E^2 + \varphi_{1E}^2} - \beta_1 \frac{C}{T_1 + T_2 + 1} - \alpha_1 T_1 - \alpha_1^* T_2 - \gamma_1^* T_1 T_2 \right) \times T_1 - \omega T_1$$

i

$$\frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{\mu_{2E} E}{E + \varphi_{2E}} + \mu_{2C} \frac{C/(T_1 + T_2 + 1)}{C/(T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{2C}} - \alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1 - \gamma_2^* T_1 T_2 \right) \times T_2 - \omega T_2$$

3.3.2 Dinàmiques de la qualitat de l'ecosistema i el capital

La dinàmica de la qualitat de l'ecosistema $E(t)$ pot ser considerada com un balanç del següents processos:

$$\frac{dE}{dt} = F(E) - D(T_1, T_2, E, C) + G(T_1, T_2, E, C)$$

on $F(E)$ descriu la dinàmica de la qualitat de l'ecosistema sense la intervenció de les altres dues

variables; D representa els danys causats per l'activitat turística a l'entorn, mentre que G representa els efectes positius produïts per la presència dels turistes.

Diferint de nou al model Casagrandi i Rinaldi original, els autors de l'article volien recalcar que les activitats turístiques també podien tenir un impacte positiu en la qualitat de l'ecosistema, G . El turisme que té cura del medi ambient T_1 , sovint anomenat *soft tourism*, podria millorar la qualitat de l'ecosistema. En àrees preservades, l'eco-turisme pot desencadenar una inversió econòmica per a fomentar la conservació d'habitats i espècies i, per tant, desenvolupament sostenible.

Mentre que al model original, s'assumeix un model dinàmic del tipus logístic en absència de capital i turisme, en aquest nou cas s'usa la següent forma funcional per a $F(E)$:

$$F(E) = \frac{rE^2}{k} - rE$$

$F(E)$ suggereix un equilibri inestable a $E = k$ ja que la característica intrínscica d'un sistema socio-ecològic real és que sempre estan lluny de l'equilibri.

Aquesta forma de funció es recolza tant en l'evidència teòrica i d'observació ja que, en el món real, l'incessable creixement de la influència humana està cada vegada afectant més al manteniment de la qualitat i la quantitat dels béns i serveis de l'ecosistema, de forma que la qualitat d'aquest disminueix inevitablement. La conversió de l'hàbitat degut a activitats humanes és l'amenaça més gran per la biodiversitat que garanteix els serveis de l'ecosistema i conseqüentment de la seva qualitat. Quan hi ha una reducció de serveis en un sistema, els seus processos interns canvien i el seu estat comença a moure's cap a un atractor diferent. Per exemple, d'aigua clara a aigua tèrbola.

Pel que fa a les interaccions D i G , cada classe de turista juga un rol diferent. La degradació del medi ambient només recau en el turisme de massa juntament amb la que causa el capital C i les modificacions que pateix l'entorn natural provocades per la construcció de les instal·lacions, infraestructures i allotjaments. Per tant:

$$D(T_1, T_2, E, C) = D(T_2, E, C) = E(\beta C + \gamma_2 T_2)$$

i

$$G(T_1, T_2, E, C) = G(T_1, E) = +\gamma_1 T_1 E$$

i d'això en resulta finalment la dinàmica de la qualitat de l'ecosistema:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{rE^2}{k} - rE - E(\beta C + \gamma_2 T_2) + \gamma_1 T_1 E$$

La dinàmica del capital $C(t)$ es considera com el balanç entre la degradació de les infraestructures turístiques i el flux de les inversions. D'acord amb *Casagrandi i Rinaldi(2002)*, les inversions són una proporció fixa als ingressos totals generats per les activitats turístiques. L'article suposa que ambdues classes de turistes contribueixen en la seva mesura al flux d'inversions.

Per tant:

$$\frac{dC}{dt} = -\delta C + \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2$$

on ϵ_1 i ϵ_2 indiquen les taxes d'inversió.

Resumint, l'article acaba obtenint el següent sistema d'equacions diferencials dinàmic de quatre dimensions:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= \left(\frac{\mu_{1E}E^2}{E^2 + \varphi_{1E}^2} - \beta_1 \frac{C}{T_1 + T_2 + 1} - \alpha_1 T_1 - \alpha_1^* T_2 - \gamma_1^* T_1 T_2 \right) \times T_1 - \omega T_1 \\ \frac{dT_2}{dt} &= \left(\frac{\mu_{2E}E}{E + \varphi_{2E}} + \mu_{2C} \frac{C/(T_1 + T_2 + 1)}{C/(T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{2C}} - \alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1 - \gamma_2^* T_1 T_2 \right) \times T_2 - \omega T_2 \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{rE^2}{k} - rE - E(\beta C + \gamma_2 T_2) + \gamma_1 T_1 E \\ \frac{dC}{dt} &= -\delta C + \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Com en el cas anterior original, tots els paràmetres són constants i positius. Concretament, el conjunt de paràmetres: μ_{1E} , φ_{1E} , β_1 , α_1 , α_1^* , γ_1 tipifiquen els eco-turistes T_1 . De la mateixa manera, els paràmetres μ_{2E} , φ_{2E} , μ_{2C} , φ_{2C} , α_2 , α_2^* , γ_2 caracteritzen el comportament cultural i les actituds del turisme de masses T_2 .

El paquet r , β , γ_1 , γ_2 , δ , k identifica els paràmetres per la qualitat dinàmica de l'ecosistema relacionat amb cert lloc turístic.

Els paràmetres ϵ_1 , ϵ_2 són taxes de polítiques d'inversió dels eco-turistes T_1 i dels mass-turistes T_2 , respectivament. Com que l'anàlisi dels aspectes econòmics està fora de l'abast de l'article, aquests paràmetres es mantenen fixes i constants. Així és que a diferència del *Casagrandi i Rinaldi (2002)*, la taxa d'inversió turística no es fa servir en el model com un paràmetre de bifurcació.

Per bé que fixar-se en els paràmetres γ_i i α_i^* seria d'interès per les dinàmiques de les classes de turistes i , en particular, per a dilucidar el paper de la interacció entre els dos tipus de turistes, l'article vol subratllar el paper interessant del paràmetre positiu de degradació w_i . Com s'ha dit anteriorment, w_i està influenciat per l'interacció de factors tant objectius com subjectius: el canvi objectiu en la qualitat dels béns i serveis de l'ecosistema n'és un, juntament amb com es percep un canvi, si és que es percep, pel diferent tipus de turista. De fet, s'espera que les diferents tipologies de turistes tinguin percepcions i judicis diferents corresponents en l'atractiu i en la seva antònima degradació de la qualitat, també en comparació amb l'atracció percebuda sobre llocs turístics alternatius. Resulta que w_i és un paràmetre complex i important en la resposta socio-ecològica, subratllant l'aspecte socio-econòmic i l'ecològic, de forma que podria ser estimat i monitoritzat al camp i aquí el fan servir com a paràmetre de bifurcació. Com a primer pas en aquesta direcció, s'assumeix que $w_1 = w_2 = w$. Deixen el cas de la desigualtat entre els paràmetres per a altres investigacions.

3.4 Model proposat

El model que proposa aquest treball intenta mantenir al màxim els elements i les relacions del model avançat esmentat, ja que s'entén com a un model del que se n'ha demostrat la validesa. Tot i això, cal fer servir els paral·lelismes corresponents per tal que tingui sentit dins l'àrea d'estudi. Les noves variables d'estat són les següents:

- T_1 es refereix a tot aquell tipus de tecnologia i robòtica de les *smart cities* destinada a millorar l'entorn, tant a nivell funcional com compositiu. D'aquesta manera, s'inclouen tota la robòtica i totes les TIC que a nivell de conformació no tinguin obsolescència programada, que estiguin fabricades amb materials biodegradables, que usin fonts d'energia renovable. A nivell funcional, són tecnologies que s'encarreguen de millorar la gestió dels residus de la ciutat, ajuden en l'estalvi energètic, milloren l'eficiència dels recursos que la ciutat fa servir, etc.
- T_2 queda definida en antítesis a l'anterior com una classe de tecnologia i robòtica que no té en compte el factor ambiental, que fa servir combustibles fòssils, fabricada amb processos i materials que malmeten l'entorn, amb obsolescència programada per tal que s'afavoreixi el cicle consumista i se'n produeixin i se'n vinguin molts més en menys temps. A causa de la seva conformació generarà més residus que la ciutat haurà d'assumir.
- C es defineix com totes les infraestructures i capital empresarial i econòmic necessaris tant per la creació dels robots com per a l'adaptació de la seva presència a l'espai d'estudi.
- E és la qualitat de l'entorn o medi ambient.

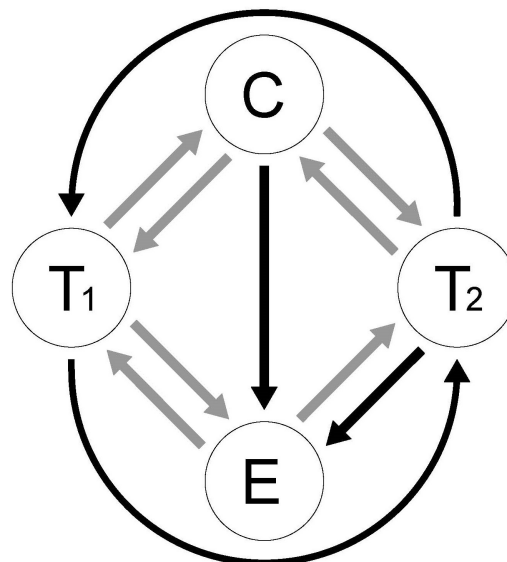


Figura 8: Interaccions entre les variables d'estat del model proposat

Així doncs, ens trobem amb la nova relació.

3.4.1 Tipologia de tecnologia i robòtica per a les *smart cities*

Com hem vist anteriorment, a cada tipologia li correspondrà una equació diferencial diferent que defineixi l'evolució de cadascuna en el temps. Prenent com a referència els models esmentats, redefinirem les noves dinàmiques de cada variable d'estat. En el model proposat, de la mateixa manera que en l'anterior, assumim que per ambdues classes de tecnologies la taxa de canvi és proporcional a l'habilitat de generar aquestes tecnologies de l'indret, de la seva capaci-

tat i espai en el mercat que genera la producció de cadascuna d'elles. És a dir que la dinàmica de l'existència de cada classe de tecnologia variarà segons la capacitat que tingui el sistema urbà. Per tant:

$$\frac{dT_i}{dt} = \hat{A}_i(T_1, T_2, E, C) T_i, \quad i = 1, 2$$

Particularment, \hat{A}_i és una capacitat relativa (*ability*), definida com la diferència entre la capacitat absoluta A_i del lloc concret i un valor de referència τ_i que indica la degradació del medi ambient, anàlogament al model explicat a l'apartat anterior. Per tant:

$$\frac{dT_i}{dt} = \{A_i(T_1, T_2, E, C) - \tau_i\} T_i, \quad i = 1, 2$$

Podríem precisar encara més i desgranar la capacitat relativa de l'ecosistema de produir aquestes tecnologies $i(T_1, T_2, E, C)$ com a la suma de tres factors: la capacitat generada gràcies a l'entorn a_E , el capital disponible per a la producció i l'existència d'infraestructures per al mateix fi a_C i les infraestructures necessàries, i el nínxol que hi hagi al mercat a_T .

Començant per la capacitat i facilitat que genera l'ecosistema per la producció d'aquests robots definim a_E de la forma:

$$a_{iE}(T_1, T_2, E, C) = a_{iE}(E), \quad i = 1, 2$$

L'eco-tecnologia i els eco-robots no fan servir combustibles fòssils i el tenim definit com un tipus de producte que no requereix una explotació dels recursos naturals tan forta com la de la segona tipologia. D'aquesta manera, aquest primer cas queda definit per la funció Monod de E com en el cas original de Casagrandi i Rinaldi.

$$a_{1E}(E) = \frac{\mu_{1E}E}{E + \varphi_{1E}}$$

Per contra, la T_2 té una necessitat molt forta dels béns i serveis i altres recursos que pot proporcionar l'entorn en el que es troba, encara que paradoxalment, el malmeti més profundament. Aquest segon cas a_{2E} quedarà definit amb una resposta funcional del tipus III com la següent:

$$a_{2E}(E) = \frac{\mu_{2E}E^2}{E^2 + \varphi_{2E}^2}$$

Paral·lelament, basada en les resposta de les dues classes de tecnologies a un bon nivell d'infraestructures per a la fabricació i l'adaptació de l'entorn urbà al funcionament d'aquestes màquines, a_{1C} es converteix en:

$$a_{iC}(T_1, T_2, E, C) = a_{iC}(T_1, T_2, C), \quad i = 1, 2$$

En el nostre cas, però tant a_{1C} com a_{2C} són iguals. Ambdues tecnologies necessiten plantes de producció, accions per a la seva fabricació i es beneficien d'una bona economia que permeti al govern invertir en la seva existència i en les modificacions pertinents que s'hagin de fer a la ciutat. Fem servir la forma de funció Monod creixent i de saturació de les instal·lacions per càpita

disponibles al lloc concret. D'aquí:

$$a_{iC}(T_1, T_2, C) = \mu_{iC} \frac{C / (T_1 + T_2 + 1)}{C / (T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{iC}}, \quad i = 1, 2$$

Finalment, si ens fixem en el nínxol de mercat que deixa la proporció de cada tecnologia, definim a_{iT} com a funció de tan sols la tipologia de tecnologies:

$$a_{iT}(T_1, T_2, E, C) = a_{iT}(T_1, T_2), \quad i = 1, 2$$

Respecte les eco-tecnologies T_1 :

$$a_{1T}(T_1, T_2) = -\alpha_1 T_1 - \alpha_1^* T_2$$

Els primers dos termes indiquen la degradació de la producció d'un tipus a causa de la presència a l'indret de tecnologies del seu mateix tipus ($-\alpha_1 T_1$), o bé per tecnologies de l'altre tipus ($-\alpha_1^* T_2$). En el cas proposat, s'ha decidit eliminar el terme $-\gamma^* T_1 T_2$ que hagués representat la pèrdua de capacitat per la interacció dels dos tipus de tecnologies o robots, ja que no ens sembla que això es doni.

Igualment, per T_2 , considerem:

$$a_{2T}(T_1, T_2) = -\alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1$$

La capacitat a_{iT} està modelada de la mateixa manera per ambdues classes i se'ls considera a ambdues susceptibles a veure's afectades per l'aglomeració de robots dins la ciutat. Els valors diferents assumits pels paràmetres indiquen com cada tipus de tecnologia l'afectarà la presència d'altres al mercat i al carrer.

Resumint, tenim:

$$\frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{\mu_{1E} E}{E + \varphi_{1E}} + \mu_{1C} \frac{C / (T_1 + T_2 + 1)}{C / (T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{1C}} - \alpha_1 T_2 - \alpha_1^* T_2 \right) \times T_1 - \tau T_1$$

i

$$\frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{\mu_{2E} E^2}{E^2 + \varphi_{2E}^2} + \mu_{2C} \frac{C / (T_1 + T_2 + 1)}{C / (T_1 + T_2 + 1) + \varphi_{2C}} - \alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1 \right) \times T_2 - \tau T_2$$

Dinàmiques de la qualitat de l'ecosistema i el capital

Anàlogament al cas de *Lacitignola et al* es considera la dinàmica de l'ecosistema com un balanç dels següents processos:

$$\frac{dE}{dt} = F(E) - D(T_1, T_2, E, C) + G(T_1, T_2, E, C)$$

on $F(E)$ descriu la dinàmica de la qualitat de l'ecosistema sense la intervenció de les altres dues variables; D representa els danys causats per l'activitat dels robots i tecnologies a l'entorn, mentre que G representa els efectes positius produïts per la presència dels robots.

En el cas present, també comptem que hi ha activitats i processos tecnològics que poden tenir un impacte positiu sobre l'entorn i la qualitat de l'ecosistema.

Fem servir, per a definir la forma funcional per a $F(E)$, la mateixa equació que el model avançat. Prenem per a bona la hipòtesi que diu que en absència de les altres variables d'estat, l'entorn tendeix a degenerar-se mica en mica per diverses causes. Tenim:

$$F(E) = \frac{rE^2}{k} - rE$$

Pel que fa a les interaccions D i G , cada classe de tecnologia juga un rol diferent. La degradació del medi ambient només recau en el robot de producció massiva juntament amb la que causa el capital C i les modificacions que pateix l'entorn natural provocades per la construcció de les fàbriques, infraestructures i adaptacions urbanes. Per tant:

$$D(T_1, T_2, E, C) = D(T_2, E, C) = E(\beta C + \gamma_2 T_2)$$

i

$$G(T_1, T_2, E, C) = G(T_1, E) = +\gamma_1 T_1 E$$

i d'això en resulta finalment la dinàmica de la qualitat de l'ecosistema:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{rE^2}{k} - rE - E(\beta C + \gamma_2 T_2) + \gamma_1 T_1 E$$

La dinàmica del capital $C(t)$ es considera com el balanç entre la degradació de les infraestructures per a la fabricació i adaptació d'aquestes tecnologies i el flux de les inversions. S'entén que qualsevol de les tecnologies fetes servir hauran de ser comprades i per tant hi haurà injecció de capital generat a partir de la fabricació d'aquestes. D'acord amb *Casagrandi i Rinaldi(2002)*, les inversions són una proporció fixa als ingressos totals generats per la producció tecnològica. Com en el cas del model avançat, suposem que ambdues classes de robots contribueixen en la seva mesura al flux d'inversions. Cal especificar, però, que en el cas dels eco-robots, l'impacte serà molt menor i quasi negligible amb el que suposarà el benefici aconseguit a través de la producció en massa del segon tipus de robot.

Per tant:

$$\frac{dC}{dt} = -\delta C + \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2$$

on ϵ_1 i ϵ_2 indiquen les taxes d'inversió.

Resumint, l'article acaba obtenint el següent sistema d'equacions diferencials dinàmic de quatre dimensions:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_1}{dt} &= \left(\frac{\mu_{1E}E}{E+\varphi_{1E}} + \mu_{1C} \frac{C/(T_1+T_2+1)}{C/(T_1+T_2+1)+\varphi_{1C}} - \alpha_1 T_2 - \alpha_1^* T_2 \right) \times T_1 - \tau T_1 \\
\frac{dT_2}{dt} &= \left(\frac{\mu_{2E}E^2}{E^2+\varphi_{2E}^2} + \mu_{2C} \frac{C/(T_1+T_2+1)}{C/(T_1+T_2+1)+\varphi_{2C}} - \alpha_2 T_2 - \alpha_2^* T_1 \right) \times T_2 - \tau T_2 \\
\frac{dE}{dt} &= \frac{rE^2}{k} - rE - E(\beta C + \gamma_2 T_2) + \gamma_1 T_1 E \\
\frac{dC}{dt} &= -\delta C + \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2
\end{aligned} \tag{3}$$

3.4.2 Definició dels paràmetres

Com en el cas anterior original, tots els paràmetres són constants i positius. Concretament, el conjunt de paràmetres: $\mu_{1E}, \varphi_{1E}, \mu_{1C}, \varphi_{1C}, \alpha_1, \alpha_1^*$ tipifiquen els eco-robots T_1 . De la mateixa manera, els paràmetres $\mu_{2E}, \varphi_{2E}, \mu_{2C}, \varphi_{2C}, \alpha_2, \alpha_2^*$ caracteritzen les activitats i les pràctiques de T_2 .

El paquet $r, \beta, \gamma_1, \gamma_2, \delta, k$ identifica els paràmetres per la qualitat dinàmica de l'ecosistema relacionat amb cert indret.

Els paràmetres ϵ_1, ϵ_2 són taxes de polítiques d'inversió dels eco-robots T_1 i dels robot de massa T_2 , respectivament. Com que l'anàlisi dels aspectes econòmics està fora de l'abast del treball, aquests paràmetres es mantenen fixes i constants. Tot i així, donada la naturalesa de les definicions que hem fet de T_1 i T_2 els beneficis econòmics aportats per la segona tipologia seran majors als primers, ja que la segona està pensada dins la lògica consumista. És a dir, $\epsilon_1 > \epsilon_2$.

Cal també tenir en compte, que en lloc de treballar amb paràmetres bifurcadors com bé podrien ser τ o les mateixes taxes de retorn de la inversió ϵ_i , aquí es treballarà amb hipòtesis que van més enllà de la modificació dels paràmetres. Ergo, considerarem, per exemple, com poden afectar la limitació externa de les variables i com pot incidir l'acció de polítiques. A més, cal remarcar que no diferenciem les τ de cada equació i ens limitem a dir que $\tau_1 = \tau_2$ i deixarem el cas desigualtat per a d'altres investigacions.

Paràmetre	Definició
μ_{1E}	Referit a la forma de la funció de Monod. Constant de creixement màxima de l'aprofitament dels recursos de T_1 .
φ_{1E}	Referit a la forma de la funció de Monod. Concentració del substrat limitant pel creixement de T_1 .
μ_{1C}	Referit a la forma de la funció de Monod. Constant de creixement màxima de les infraestructures per càpita.
φ_{1C}	Referit a la funció de Monod. Concentració del substrat limitant del creixement T_1 .
α_1	Constant de decreixement segons quantitat ja ofertada de T_1 .
α_1^*	Constant de decreixement segons quantitat ja ofertada de T_2 .
μ_{2E}	Referit a la forma de la funció de Monod. Constant de creixement màxima de l'aprofitament dels recursos de T_2 .
φ_{2E}	Referit a la forma de la funció de Monod. Concentració del substrat limitant pel creixement de T_2 .
μ_{2C}	Referit a la forma de la funció de Monod. Constant de creixement màxima de les infraestructures per càpita.
φ_{2C}	Referit a la funció de Monod. Concentració del substrat limitant del creixement T_2 .
α_2	Constant de decreixement segons quantitat ja ofertada de T_2 .
α_2^*	Constant de decreixement segons quantitat ja ofertada de T_1 .
r	Constant de decreixement intrínscica de l'ecosistema.
β	Constant de decreixement de l'entorn per infraestructures.
γ_1	Constant de preservació dels recursos.
γ_2	Taxa d'ús dels recursos.
δ	Taxa d'inversió en infraestructura.
k	Capacitat de càrrega de l'ecosistema.
ϵ_1	taxa d'inversió en T_1 .
ϵ_2	taxa d'inversió en T_2 .

Taula 1: Taula de paràmetres

4 Anàlisi de resultats

Cada model ha estat simulat a través de SIMULINK i MATLAB. L'anàlisi de resultats només se cenyirà, però, en aquest darrer model proposat, ja que dels dos anteriors ja se n'han fet els estudis pertinents pels seus autors.

4.1 Cas d'estudi

Amb l'objectiu de validar el model, s'ha triat un cas d'estudi particular real: Singapur. Un dels motius que han conduït a aquesta elecció ha estat la facilitat de disposar d'un portal de dades obert que permetés la definició dels paràmetres. Com a afegit, també és de les ciutats que són punteres en tecnologia intel·ligent i robòtica.

La República de Singapur és una ciutat-estat en forma d'illa al sud-est asiàtic. La punta més al sud del país es troba a un grau per sobre l'Equador. El seu territori consisteix en una illa principal a més de 62 illots. Des de la seva independència, la seva àrea ha crescut un 23% (130 km). El país és conegut per haver-se transformat d'un país en vies de desenvolupament a un desenvolupat en una sola generació sota el mandat del seu fundador Lee Kuan Yew. Després d'anys de turbulències polítiques i malgrat no tenir gaire recursos naturals ni territori rural, la nació es va desenvolupar ràpidament convertint-se en un dels 4 tigris asiàtics, gràcies al comerç extern i a la seva força de treball.

Pròspera en àmbits educatius, d'entreteniment, de finances, de salut, de capital humà, innovació, logística, tecnologia, turisme, comerç i transport, la ciutat sobretot despunta per estar tecnològicament molt preparada. Reconeguda com a líder en *smart cities* és també, en part gràcies a aquest fet, un dels estats més segurs, el segon estat més competitiu, la cinquena ciutat més innovadora, el segon port amb més aflluència i el tercer centre més gran de refinament i intercanvi de petroli. Ha estat classificada per *The Economist* com la ciutat més cara, des del 2013 i està considerada un paradís fiscal. Es troba en la posició 9ena a l'índex de desenvolupament humà de les Nacions Unides amb el 3er PIB per càpita més alt. Té bons indicadors socials, tot i que hi ha alhora una gran desigualtat salarial. Malgrat això, el 90% d'habitatges estan ocupades pels seus propietaris. És una democràcia uni-partidista.

El pla d'expansió del país no s'atura. El principal problema és que mentre l'ocupació del sòl creix, les illes properes s'han començat a encongir, ja que aquestes són les encarregades de proporcionar el 80% de la sorra necessària per als projectes d'ampliació. Això ha provocat que alguns dels illots més petits de Riau hagin quedat submergits sota el mar, i altres illes majors han vist com les seves platges es reduïen de mida.



Figura 9: Mapa de Singapur

Població	5.888.926 (2017)
Superfície	719,1 km ²
Aigua	1,44%
PIB per càpita	52.888,74 \$ (2015)

Taula 2: Fitxa de Singapur

4.1.1 Definició de paràmetres

A través del portal de dades obertes que té Singapur s'ha treballat amb dades massives fent-ne l'anàlisi corresponent per a poder extreure paràmetres fiables per tal que el model tingués validesa en el cas que s'estava estudiant. No es disposaven d'algunes dades que haguéssin permès al model guanyar precisió, per això ha calgut fer estimacions i extrapolacions per tal d'obtenir els valors necessaris. Amb excepció d'alguns casos en què es jugarà a variar algun paràmetre concret, farem servir els paràmetres trobats per aquest cas d'estudi en cada cas estudiat. A més, en la majoria dels casos, la variable temporal estarà acotada els 10 anys, ja que és el període en què es pretén fer una transformació total, a Singapur i a arreu, cap a les *smart cities*.

4.2 Evolució de l'entorn en absència d'interacció amb les altres variables

Si es fa l'anàlisi centrat en el medi ambient en absència d'interacció entre variables, resulta que, a la llarga, la qualitat dels béns i serveis de l'entorn tendirà a decreixre fins a arribar a l'exhauriment de recursos. Tot i això, es pot observar que sense que les altres variables d'estat entrin en joc, la degradació total demana molt de temps. Ho il·lustra la figura 10.

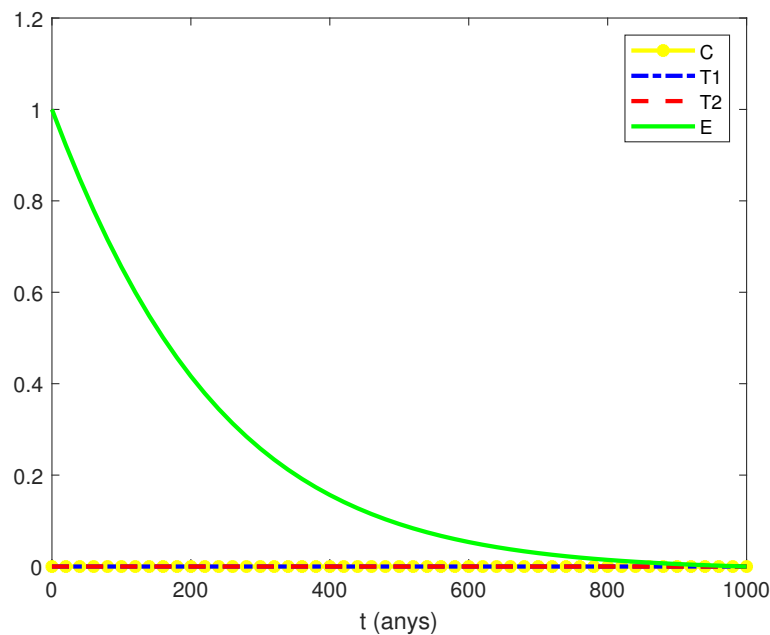


Figura 10: E sense interacció de variables

4.3 Absència de producció de tecnologies

Partint del cas anterior, si afegim al model dinàmic la interacció amb les infraestructures i el capital, és fàcil observar que aquest fet provoca un deteriorament del medi ambient molt més pronunciat de bon començament. Tot i això, de seguida s'atura ja que el capital, a falta de beneficis, tendeix a esgotar-se per sí sol. Cal que hi hagi un retorn a la inversió en infraestructures inicials que el permeti seguir el cicle. (Fig 11)

Per altra banda, des d'un punt de vist més curt-terminista, s'acota el temps d'anàlisi als 10 anys, cosa que permet tenir una visió més clara de com actuen les variables entre elles de bon inici, la coexistència de E i C en absència de tecnologies. (Fig 12)

Els valors estan normalitzats perquè la interacció sigui més fàcil de valorar, però el mínim assolit pel medi ambient no implica que sigui l'esgotament de tots els recursos.

4.4 Producció de tan sols un tipus de tecnologia

Es planteja el cas en què només es produeix una de les dues tipologies de tecnologies i robots descrits. Com que l'increment de producció de cadascuna depèn del seu estat previ, si aquest és nul es pot eliminar totalment l'existència d'un d'aquestes variables. Aquest cas el dividim en dos: el primer tan sols comptarem amb la producció de T_1 i en el segon tan sols amb la de T_2 .

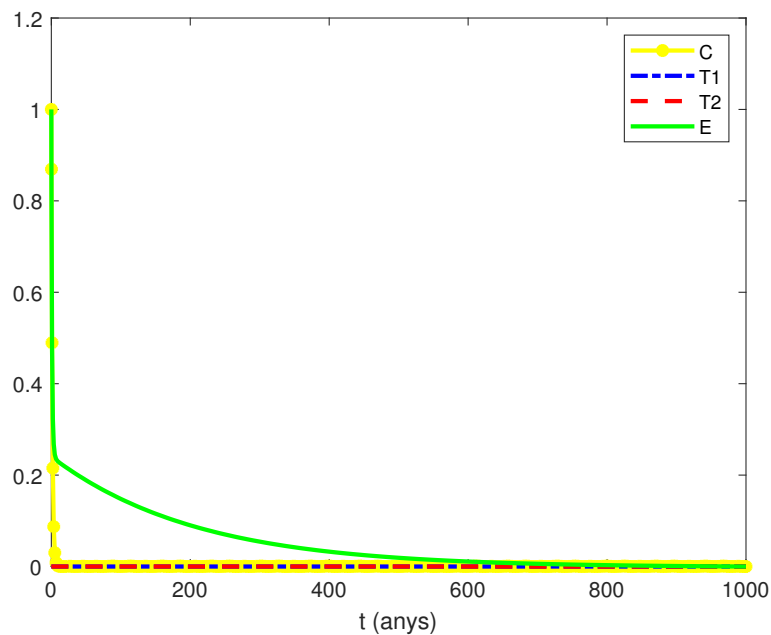


Figura 11: Anàlisi en absència de tecnologies i mostra temporal de 1000 anys

4.4.1 Absència de producció de eco-tecnologies i eco-robots

El cas que es presenta quan s'elimina la presència de les tecnologies pensades per a tenir cura de l'ecosistema genera en una ràpida disminució de la qualitat i els béns i serveis de l'entorn. A causa d'això, el que al principi havia estat un creixement de la producció de la tecnologia del tipus 2 de generació de capital i infraestructures, de seguida es veu afectat per la manca de recursos i en 10 anys tot se'n va en orris. (Fig 13)

4.4.2 Absència de producció de tecnologies de segona classe T_2

En canvi, l'absència de tecnologia i robòtica T_2 condueix a un escenari més interessant. En 10 anys tot es manté força constant i estable tant pel que fa a l'entorn, com pel que fa a la producció d'eco-tecnologies i eco-robòtica. És notable, però, el decreixement del capital d'infraestructures tecnològiques. (Fig 14) Per a poder afirmar alguna cosa més, s'amplia la mostra temporal a 500 anys. D'aquesta manera, podem observar a ull nu, ara sí, com la producció de tecnologies es veu afectada per la manca d'infraestructura i com el medi ambient acaba gaudint de l'hegemonia ell sol mentre es va degradant lentament pel pas dels anys. (Fig 15)

4.5 Convivència de totes les variables d'estat

Aquest cas se centra en la convivència de totes les variables d'estat. Partint de posicions pròximes als punts d'equilibri, podem distingir casos de dominància segons les condicions inicials.

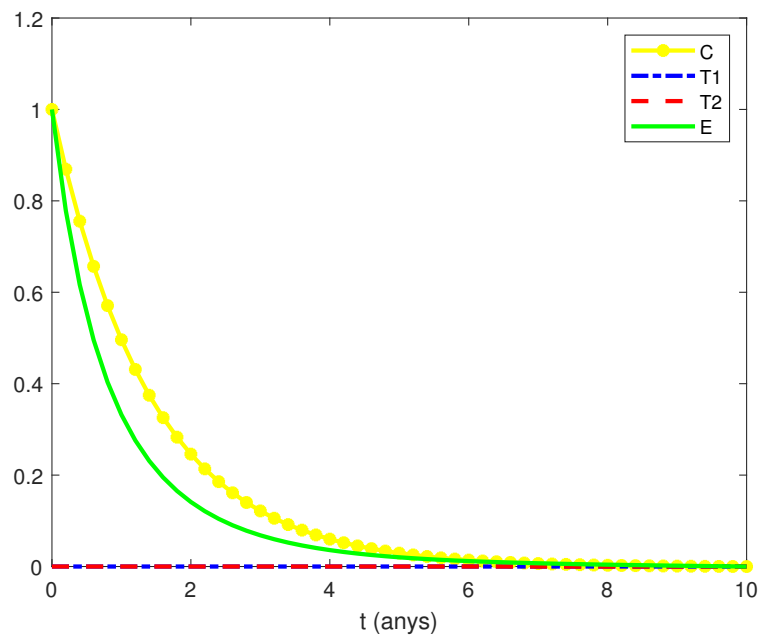


Figura 12: Anàlisi en absència de tecnologies i mostra temporal de 10 anys

4.5.1 Dominància de T_1

En un escenari més realista en què tot conviu, veiem que en el període de 10 anys, els eco-robots i les eco-tecnologies no són suficients per a millorar l'entorn, però que tot queda força estabilitzat en un valor. En aquest cas de condicions inicials properes a un equilibri, la presència de T_2 és força baixa d'entrada i ni l'entorn ni el capital són capaços de revifar-ne la producció. C es veu molt beneficiada per l'hegemonia inicial de T_1 , de tal forma que experimenta un gran creixement. Això fa que els béns i serveis de l'entorn es vegin prou afectats sense que la tecnologia "ecologista" ho pugui contrarestar. (Fig 16)

Canviant les condicions inicials i prenent un altre equilibri de base on els béns i serveis de l'entorn són superiors, veiem com C té un increment similar al cas anterior. Malgrat això, la producció de T_1 i la qualitat de l'ecosistema aconsegueix mantenir-se al principi i fins i tot millorar a 10 anys vista, alhora que ho fan C i T_1 . En canvi, la producció de T_2 és molt inferior a la de T_1 i fins i tot decreix a poc a poc. (Fig 17).

4.5.2 Dominància de T_2

Seguint en la línia de la convivència de totes les variables d'estat, ara s'explora el cas antònim en què T_2 es troba en hegemonia productiva. És fàcil observar a ull nu que a penes hi ha incentius ni capacitat per a crear T_1 , ja que T_2 ocupa tot el mercat i, tot i que això faci augmentar beneficis cosa que implica més capacitat productiva, la qualitat de l'entorn es veu greument afectada i de seguida deixa de proveir els recursos necessaris per a continuar amb el cicle. (Fig 18)

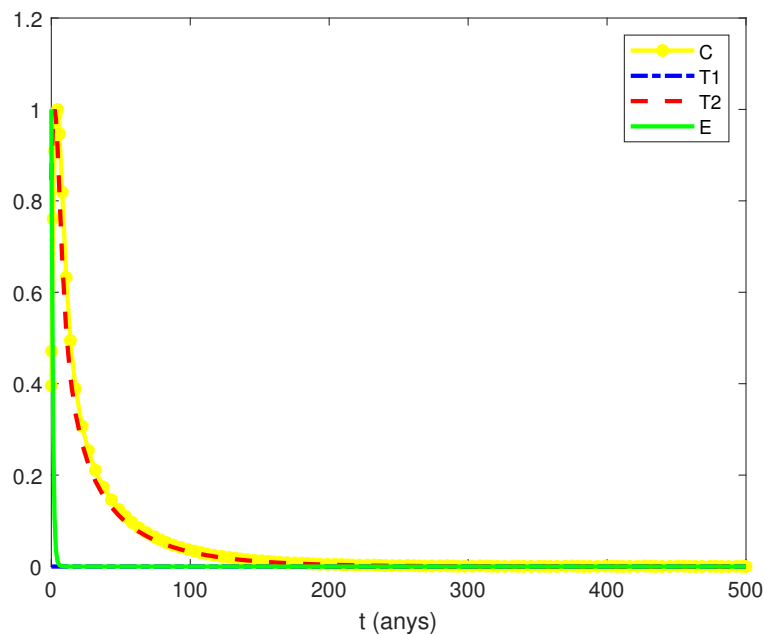


Figura 13: Anàlisi en absència de T_1 i mostra temporal de 10 anys

4.6 La degradació τ augmenta

El següent cas se centra en un escenari on la degradació del medi ambient és més pronunciada. La capacitat que proporciona l'ecosistema en forma de recursos en la producció de les tecnologies disminueix, cosa que implica un decreixement més pronunciat en la capacitat absoluta de produir T . Aquest fet deriva en una desaparició precipitada en la producció de tecnologies i robots en general, sense tenir-ne en compte la tipologia, i una consegüent desaparició del capital. L'entorn quedaria malmès, però no del tot i en un període de 10 anys estaria estabilitzat, tot i que com s'ha pogut comprovar, acabaria al cap dels anys com la resta de variables. (Fig 19)

4.7 Variació en les inversions

En aquest cas concret, en comptes de variar el paràmetre τ , ens fixem en els paràmetres que indiquen la inversió de capital que es fa a cada tecnologia.

4.7.1 Cas d'inversió nul·la a les eco-tecnologies $\epsilon_1 = 0$

Primerament, s'observa l'evolució de la dinàmica on no s'inverteix en T_1 . Com il·lustra la figura 20, la qualitat de l'entorn i la producció de T_1 cauen ràpidament deixant lloc a un creixement desenfrenat de C en especial, i també de T_2 . En el sisè any el comportament del sistema s'instabilitza.

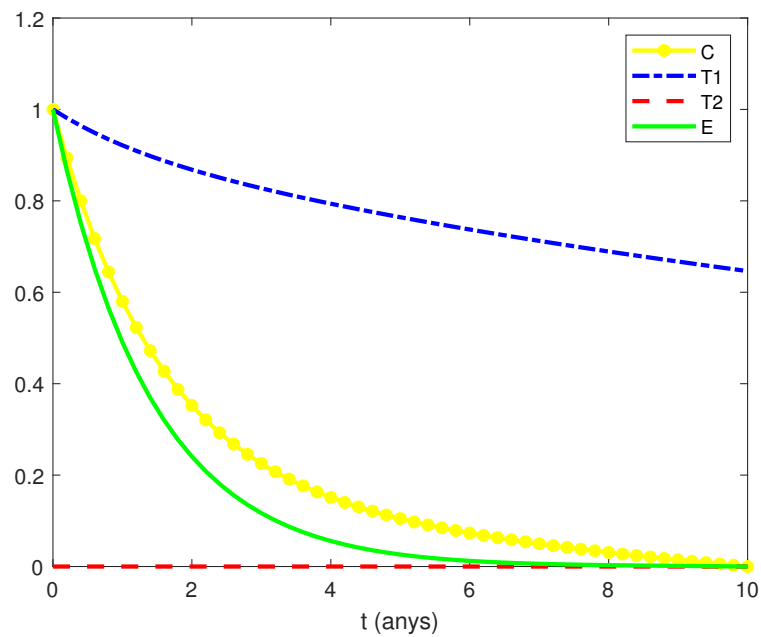


Figura 14: Anàlisi en absència de T_2 i mostra temporal de 10 anys

4.7.2 Cas d'inversió nul·la a les eco-tecnologies $\epsilon_2 = 0$

La manca d'inversió en T_2 no la condemna a la desaparició ja que té capacitat suficient per a seguir-se produint. Això és causat per la preservació dels recursos, ergo, de la capacitat que l'ecosistema ofereix a la producció de T_2 . (Fig 21)

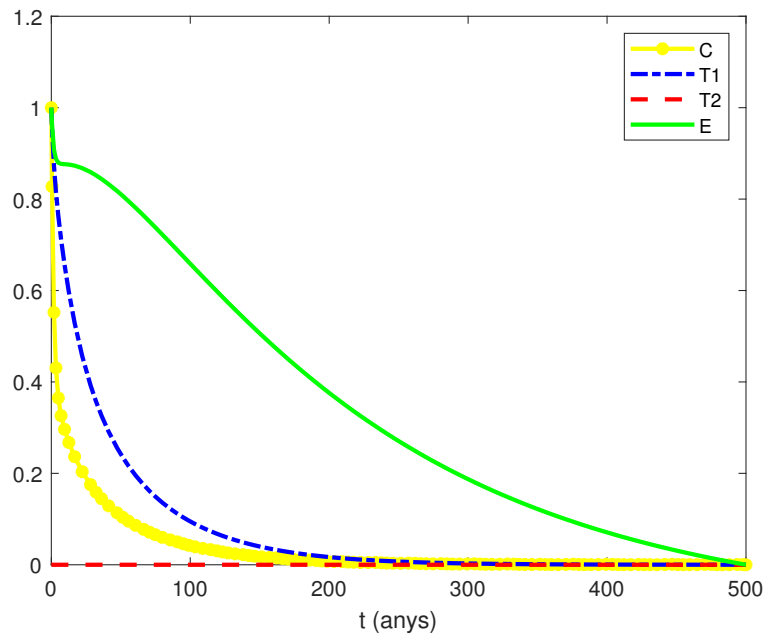


Figura 15: Anàlisi en absència de T_2 i mostra temporal de 500 anys

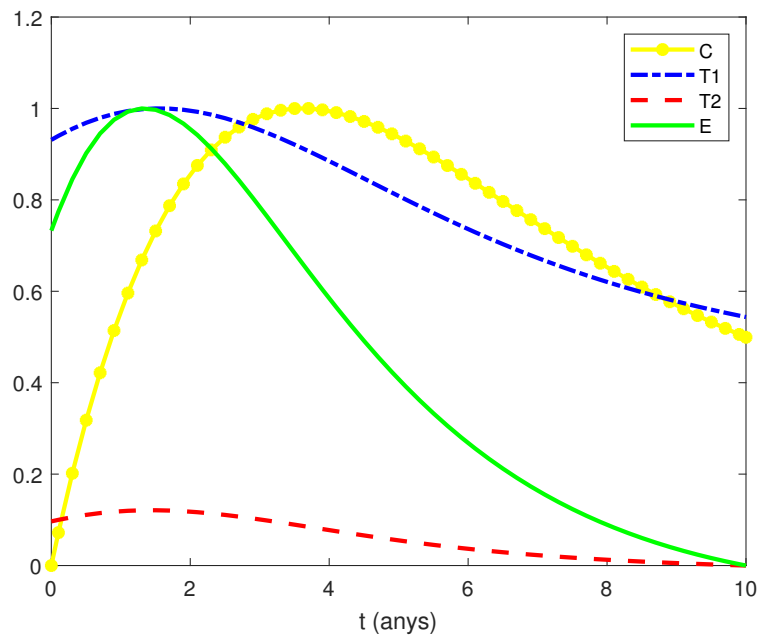


Figura 16: Dominància inicial de T_1

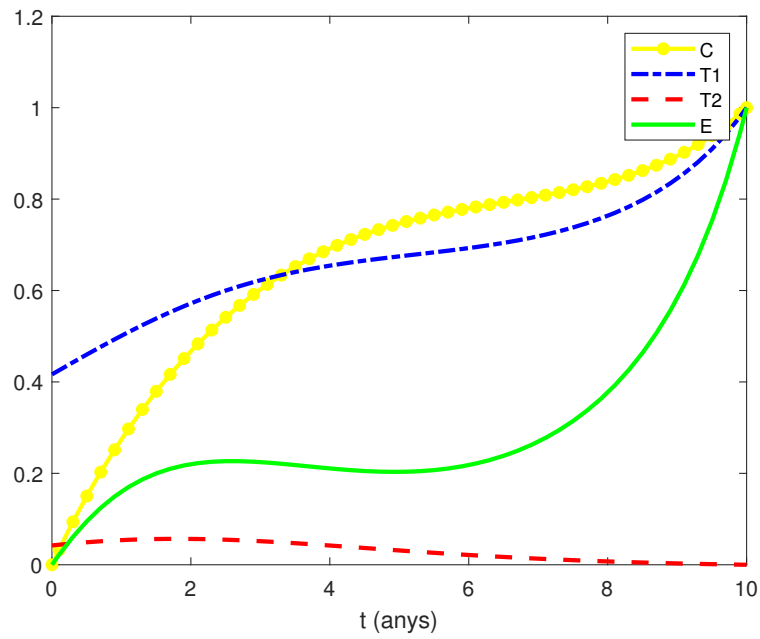


Figura 17: Dominància de T_1 partint de condicions inicials de qualitat ambiental superiors

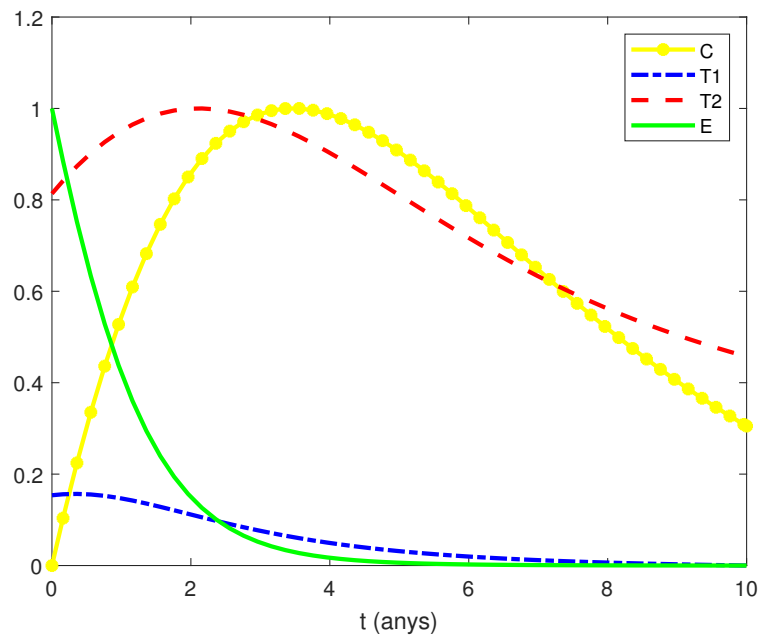


Figura 18: Convivència de tots les variables amb dominància inicial de T_2

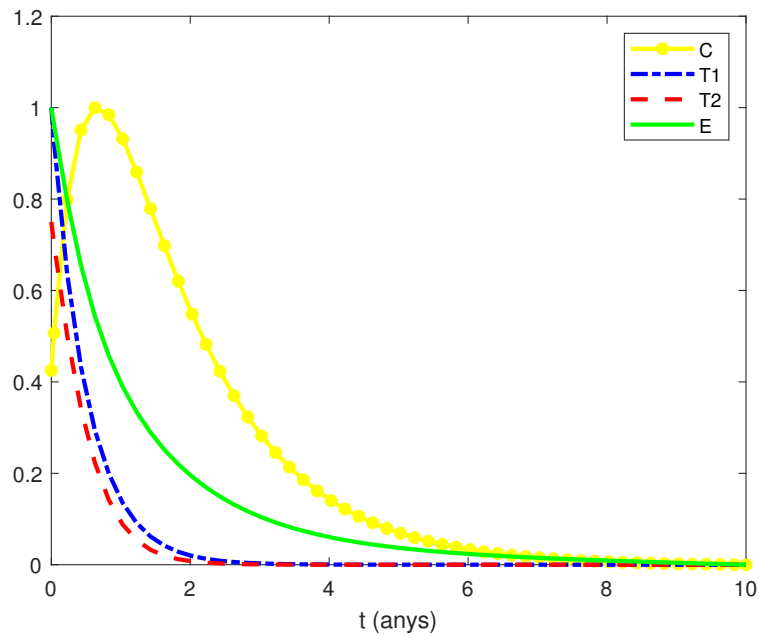


Figura 19: Incrementant el paràmetre $\tau = 2$ que indica una degradació major dels béns i serveis de l'ecosistema

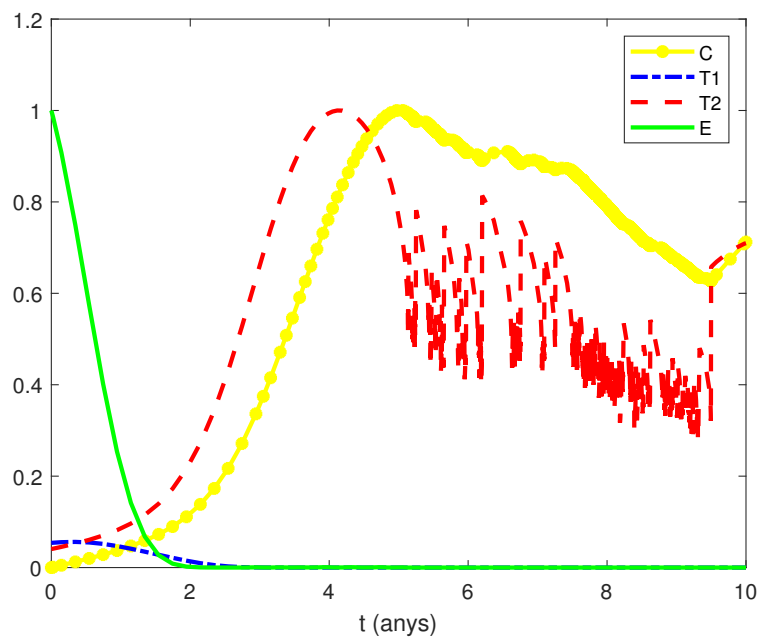


Figura 20: Inversió tan sols en T_2 normalitzada

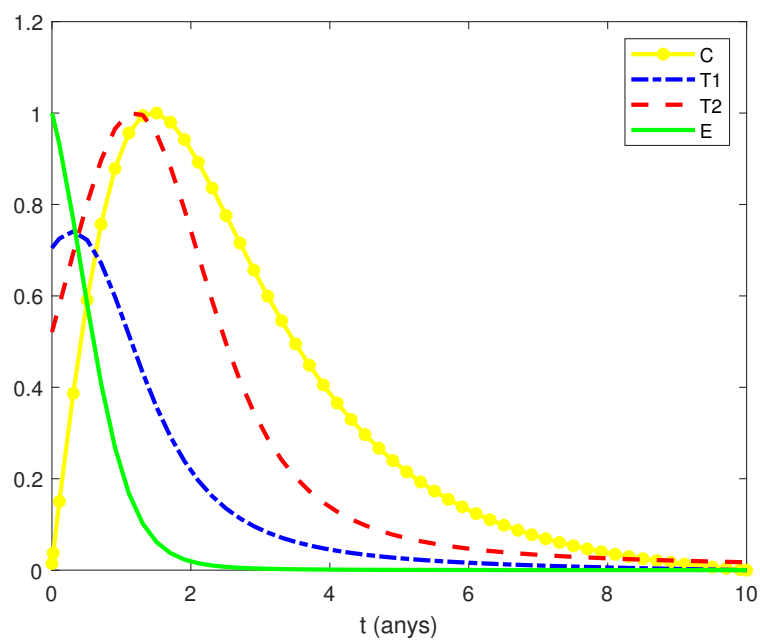


Figura 21: Inversió tan sols en T_1 normalitzada

5 Pressupost

L'objecte del pressupost explicat en aquest apartat és el d'establir el cost d'aquest projecte, que ha requerit bàsicament només de cost material i cost personal.

5.1 Cost de personal

El cost de personal del treball recauria a l'estudiant, és a dir, a les hores que hi he invertit per a enllestir-lo. Tenint en compte que la universitat descriu que les hores equivalent als 1 ECTS és d'entre 20 i 30h i que el projecte pesa 12 crèdits obligatoris dins el pla docent del grau, això equivaldria a una dedicació total d'entre 240 a 360 hores. De totes maneres, havent fet el càlcul total a les hores treballades, és més precís afirmar que s'hi han dedicat al voltant de 420 hores, que equivalen a 35 hores per crèdit. Cal a més considerar que el sou mínim recomanat a les pràctiques laborals de la Universitat Politècnica de Catalunya és de 8h/hora. D'aquesta manera, el preu que implica aquesta feina a nivell de personal és de 3.360 €.

5.2 Cost de llicències

A nivell de software, dins el cost de les llicències, s'inclouen la de Windows, la de MATLAB i SIMULINK i la de Microsoft Office, ja que s'ha fet servir també l'Excel per a l'anàlisi de dades de Singapur. Alternativament, però, cal destacar que la redacció del treball s'ha dut a terme amb el programari lliure d'edició LaTeX i d'aquesta mateixa manera s'hagués pogut fer servir programari lliure en els aspectes anteriors. És a dir, en comptes de fer servir el MATLAB, usar l'Octave i en comptes de fer les simulacions en SIMULINK, executar-les mitjançant la seva versió de programari lliure Flow Designer. D'aquesta forma es podria reduir significativament el cost del treball. No obstant, com que ja tenia aquestes eines proporcionades per la universitat, m'he limitat a aprofitar-les i per tant, cal incloure-les dins el pressupost.

5.3 Cost de material

Al cost del material comptem el hardware amb el que s'ha treballat: el portàtil, el ratolí i el carregador.

5.4 Cost energètic

Dins el cost energètic s'ha inclòs l'accés a internet, crucial per l'elaboració del projecte, i d'altres elements tant o més importants com són l'electricitat i la connexió. Fent un càlcul de tot plegat això equivalia a 0.05 €/h.

5.5 Cost total associat

El cost total associat és de 5.406 €, tenint en compte tots el que s'ha esmentat, com es pot comprovar a la Taula.

Article	Cost	Hores/Unitats	Total[€]
Sou de l'estudiant	8 €/h	420	3.360
Llicència de Windows	135 €	1	135
MATLAB i SIMULINK	800 €/any	1	800
Llicència de l'Office	70 €/any	1	70
Internet, electricitat, connexió	0.05 €/h	420	21
Portàtil	1000 €	1	1000
Ratolí	10 €	1	10
Cables i carregador	10 €	1	10
Total			5.406 €

Taula 3: Pressupost del projecte

6 Impacte ambiental

En aquest treball de fi de grau, s'ha emprat el terme sostenibilitat sobretot des de la perspectiva mediambiental. L'objectiu del treball és posar posar de relleu la necessitat de la preservació de l'entorn: flora, fauna, biodiversitat i el control dels residus i les emissions d'un indret urbà en l'era tecnològica i de creixement demogràfic de les ciutats.

De per sí, doncs, apart del cost energètic que ha suposat, el procés seguit no ha malmès l'ecosistema especialment. De fet, donat l'èmfasi que es dona a l'entorn, pot ser una eina més per la lluita contra el canvi climàtic o de la transformació del sistema energètic, elements clau per a un futur sostenible per a empreses, per la societat i especialment per al medi ambient. El treball present subratlla la importància cap a la transició d'un sistema més circular ja que la generació de residus sòlids, aigües residuals i emissions de gasos amb efecte d'hivernacle suposen una amenaça a les condicions d'habitabilitat del planeta.

Des d'aquest punt de vista, el projecte, podria generar més beneficis ambientals que impacte negatiu, malgrat que qualsevol activitat humana, modifiqui l'entorn.

7 Impacte social

Aquest treball ha omès dins l'anàlisi dinàmic la societat com a variable d'estat. Això en cap cas implica que s'ometi el paper que evidentment hi juga. És la societat que posa actius per a la creació de tecnologies, infraestructures i la principal beneficiada en l'existència de tecnologia i robòtica. Si s'hagués decidit realçar la part social en comptes de l'ambiental, possiblement haguéssim dividit la tecnologia i la robòtica en dues tipologies diferents, segons el seu impacte social i s'hagués obtingut una eina de mesura d'impacte. No obstant, la societat també depèn en gran mesura del seu entorn. De fet, sense un ecosistema que la substenti, la humanitat no sobreviuria. D'aquesta manera, és lògic afirmar que millorar la qualitat de l'entorn suposaria una millora en la vida dels ciutadans.

A mode d'exemple: a Barcelona, durant el període del 2011 al 2015, es van produir un tot $50\mu g/m^3$, una mitjana de 15-16 dies amb superacions a l'any. Segons el CREAL (Centre de Recerca en Epidemiologia Ambiental) si el nivell de pol·lució disminuís al límit establert per la Unió Europea, s'evitarien 1.200 morts prematures per any a l'àrea metropolitana de Barcelona, un 4% de les actuals. De fet, en cas que s'assolís la recomanació de l'OMS, la xifra es triplicaria: 3.500 morts evitables, un 12%. En termes d'esperança de vida, s'incrementaria en 5 mesos amb els nivells UE, i 14 amb els de l'OMS.

Per tant, de manera innegable, un bon impacte ambiental comporta un bon impacte social i una qualitat de vida dels ciutadans superior.

Conclusions

A l'anàlisi de resultats s'han avaluat casos més realistes que d'altres ja que alguns escenaris s'han portat al límit per a veure'n el comportament, però en conjunt es pot arribar a la reafirmació de la situació d'emergència en què es troba el nostre ecosistema i a la necessitat creixent de posar-hi remei. Les eco-tecnologies ajuden a pal·liar els efectes negatius que pateix dia rere dia el medi ambient, però no són en la majoria de casos suficients per neutralitzar-los. És obvi que no n'hi ha prou amb què hi hagi tecnologia i robòtica pensada per a afavorir la qualitat dels béns i serveis de l'ecosistema, sinó que es limiti la producció de tota aquella que per contra es dedica a aprofitar-se'n. A curt termini, la coexistència de cada variable és sostenible, en el cas que hi hagi una hegemonia general d'eco-robots i eco-tecnologies. De fet, l'escenari més desitjable és el que es mostra a la Figura 17, on es parteix d'unes bones condicions inicials de la qualitat del medi ambient i on la producció inicial d'eco-tecnologies és superior a la resta. Tot i això, només és un escenari possible donades aquestes condicions inicials.

És per tant de vital importància destacar que el model proposat descrit en aquest treball parla de generació espontània de cada tecnologia segons les condicions inicials i respecte aquestes, la capacitat que té cadascuna de ser creada. Ara bé, que es pugui fabricar no implica que es faci. És a dir, com s'ha dit anteriorment al llarg de la història, no és l'espasa, si no la mà que l'empunya. És per això que tot depèn del que decidim fer amb els nostres recursos. Podrem fer-los servir per a tecnologies que només malmeten l'ecosistema i n'exhaureixen els recursos fins que no en quedi res, o bé mesurar-ne el seu ús per a poder-los aprofitar de manera sostenible.

Hi ha algun escenari en què s'aconsegueix preservar l'ecosistema, però és a costa de la desaparició o gran decreixement de les altres variables (15). Tot i que la idea del decreixement és interessant, no es contempla com un escenari desitjable ja que les tecnologies milloren la qualitat de la vida humana, la fan més fàcil i prescindir-ne no és la situació que es busca. Del que es tracta és d'aconseguir trobar escenaris sostenibles on la convivència a llarg termini sigui factible.

Aquest model dinàmic pot ser vàlid com a eina de governança, per tal de predir les conseqüències que comporten les accions en l'era de les ciutats intel·ligents. Una era que, més d'hora que tard, l'aparició de robòtica i innovacions tecnològiques seran el pa de cada dia i l'impacte que tindran s'ha d'adreçar amb urgència. La modelització d'aquest sistema urbà i les simulacions realitzades treballen en aquest sentit. És evident que no és l'eina definitiva, però sí que compleix els requeriments bàsics per a explicar els efectes dels canvis que es produiran.

A més, si es perfecciona de la mà dels qui poden incidir en les polítiques, els recursos que aporta l'accés precís a les dades necessàries, permetrà la millora i optimització de l'eina. En aquest aspecte, l'anàlisi de dades de Singapur que s'ha dut a terme és evidentment rigorosa, però probablement incompleta i seria una bona oportunitat poder accedir a tota la informació necessària per a millorar-ne l'efectivitat. Els models dinàmics socioeconòmics han d'estar en reavaluació constant, ja que no responen a lleis físiques ni biològiques, malgrat aquestes s'usin com a analogia per descriure'ls. A més, cada sistema urbà tindrà una òptica diferent i l'eina és prou flexible per adaptar-se a cadascun a través de la variació dels paràmetres.

Aquest treball no pot abarcar cada matís que té el concepte de *smart city*, però no oblida les crítiques legítimes que rep, com és l'alerta de certs sectors crítics en vers la societat de la informació i com aquesta es podria convertir en una eina de control social. Des de la perspectiva

personal, considero que la tecnologia i l'enginyeria s'han de posar al servei de les persones. Per tant es parteix d'aquest supòsit, també d'aquesta manera començant a dibuixar camins propis per a seguir-lo.

Propostes de futures investigacions

El potencial del projecte és tan vast que obre noves línies d'investigació a les que fóra bo dedicar-hi temps i interès futurs i que queden fora l'abast del treball present.

- **Afinar els paràmetres i aplicar-ho a Barcelona**

Com s'ha comentat, l'afinament dels paràmetres del model és una perspectiva per a pararihi atenció. Si es disposa de més informació, les estimacions seran encara més fiables i el model més descriptiu i més bon predictor de la realitat. Cal recordar que s'ha escollit la ciutat Singapur per la facilitat que oferia de manipular dades, cosa que ciutats com la pròpia, Barcelona, encara no ofereixen. Hagués estat de gran interès parlar a nivell local, ja que és més atractiu poder incidir a la realitat immediata i compartida. Es delega doncs, a futures investigacions

- **Canviar paràmetres de bifurcació**

Una nova línia de recerca es podria centrar en un paràmetre en concret i a variar-lo i extreure'n les conclusions corresponents. També podria considerar-se el cas més específic en què $\tau_1 \neq \tau_2$ o bé fer una investigació profunda convertint la inversió en un paràmetre de bifurcació.

- **Afegir el factor social**

Personalment, l'ampliació de l'anàlisi feta que considero més enriquidora és la d'afegir el factor social al model. Es podrien adreçar les qüestions crucials de com afecta la tecnologia a la societat, si és beneficiosa o perjudicial. És evident que necessitem l'entorn per a sobreviure com s'ha explicat a l'apartat de l'impacte social, però no es tracta de sobreviure a qualsevol preu, sinó de fer-ho amb condicions dignes per a tothom. En aquest aspecte, la tecnologia també juga un paper gens negligible en l'actualitat i en el futur proper.

Agraïments

A la Yolanda, la tutora del treball, per l'assessorament i l'ajuda proporcionada. També al Toni per haver seguit igualment de prop el projecte i haver ofert el suport del seu punt de vista i el seu coneixement.

A la mare, al pare, al Quim, a l'àvia i la tieta, per formar part del meu nucli dur particular. A l'avi, a qui tot coneixement l'apassionava.

A l'Assemblea d'Estudiants i a L'ALTRE Fòrum per ser un oasi dins la universitat, pels riures alliberadors i l'amistat.

A les amigues i als amics que sempre tenen a punt el gest i la paraula justa.

Bibliografia

- [1] ANTONI GRAU *Automàtica i sostenibilitat*, Edicions UPC, 30 de Juny 2006
- [2] D. LACITIGNOLAA, I. PETROSILLO, M. CATALDI, G. ZURLINI *Modelling socio-ecological tourism-based systems for sustainability*, ELSEVIER, Science Direct, 7 de Maig 2007
- [3] KOMNINOS, NICOS *Intelligent cities: innovation, knowledge systems and digital spaces.*, London: Spon Press, 2002.
- [4] ANDREW JOHN WIT, TYLER SCHOOL OF ART *Investigations in Robotic Urbanism: Rediscovering urban space through interactive, data driven installations.*, Research Gate, octubre 2015
23/03/2019
- [5] MATEJA KOVACIC *Robot cities: three urban prototypes for future living*, The Fifth State, abril 2018
7/04/2019
- [6] GREENFIELD, A., *Against the smart city.*, London: Verso, 2013.
6/04/2019
- [7] KOMNINOS, NICO, *Intelligent cities: innovation, knowledge systems and digital spaces.*, London: Spon Press, 2002.
6/04/2019
- [8] HOLLANDS, R. GT, *Will the real smart city please stand up?*, City 12, 2008
6/04/2019
- [9] EUROPEAN COMISSION, *Indicators for Sustainable Cities*, ENVIRONMENT, November 2015
- [10] SINGAPORE'S GOVERNMENT OPEN DATA PORTAL, *data.gov.sg*
23/04/2019