

# Dilemmi sociali con interazione localizzata: alcune considerazioni preliminari\*

Pier Luigi Sacco<sup>(1)</sup> e Marco Sandri<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Dipartimento di Scienze Economiche  
Università di Bologna, Piazza Scaravilli 2 - 40126 Bologna

<sup>(2)</sup>Centro di Informatica e Calcolo Automatico  
Università di Verona, Via dell'Artigliere 19 - 37129 Verona

## 1 Introduzione: la topologia relazionale come 'forma' dell'interazione sociale

Negli ultimi anni la teoria economica ha manifestato un crescente interesse nei confronti della dimensione 'sociale' delle motivazioni e dei comportamenti individuali. Al tipo ideale dell'*homo economicus* che vive all'interno di un proprio mondo 'autonomo' nel quale l'interazione con gli altri individui è mediata dall'azione impersonale del mercato, e per il quale qualunque motivazione ha una natura intrinsecamente individualistica, si è così cominciato (o ri-cominciato, se si considera il ruolo cruciale assegnato alla dimensione sociale dell'attività economica all'interno della tradizione di pensiero classica) a contrapporre il tipo ideale dell'*homo sociologicus*, un individuo le cui motivazioni e i cui comportamenti sono interamente determinati dal contesto sociale in cui questo opera e in particolare dal sistema delle norme sociali

---

\*Alcune delle idee qui esposte sono state presentate in una forma ancora embrionale nel marzo 1994, all'interno del ciclo di seminari organizzato dal Dipartimento di Sociologia dell'Università di Napoli Federico II. Un ringraziamento particolare va a Gerardo Ragone, per l'ospitalità e per gli stimoli intellettuali profusi, e a Federico Perali per alcuni preziosi suggerimenti.

vigenti in quel contesto. Come ha osservato Granovetter (1985), questa contrapposizione è in realtà rigida e poco costruttiva. Gli incentivi di natura economica orientati ai benefici materiali (utilità, profitto) e quelli di natura sociale orientati al riconoscimento e al consenso convivono di fatto all'interno di un unico, complesso sistema motivazionale che non è interamente riconducibile né alle preferenze individuali né al sistema delle norme sociali vigenti. La razionalità individuale, di stampo più o meno massimizzante, porta gli individui ad interagire all'interno di una vera e propria topologia relazionale che definisce da una parte le probabilità e opportunità di incontro e dall'altra la natura del *feedback* informativo di cui ciascuno può disporre. Quale che sia il loro grado di ottimalità, le scelte individuali vanno quindi necessariamente pensate all'interno del contesto sociale che da una parte costituisce un vincolo alle possibilità di azione, ma dall'altra contribuisce a definire la struttura stessa del 'paesaggio' delle alternative decisionali, il tipo di esperienze a cui i soggetti possono attingere nel costruire la propria percezione del mondo, le modalità con cui tali esperienze verranno interpretate, eccetera (cfr. Berger e Luckmann (1966)).

L'esistenza di un contesto sociale fa sì che ciascun individuo attribuisca un peso ed un significato diverso alle varie interazioni interpersonali. In primo luogo, alcuni individui saranno 'più importanti' di altri: l'esistenza dei legami familiari, l'insorgenza di relazioni più o meno permanenti e orientate allo scambio mutualistico e ricorrente di risorse, informazioni, riconoscimento, costituiscono delle fonti naturali di asimmetria e di differenziazione: da una parte, ciascuno osserva i comportamenti degli individui per lui 'più importanti' (e quindi 'più vicini' all'interno della topologia relazionale) con maggiore frequenza rispetto a quelli di individui 'anonimi' (con i quali non esiste cioè alcun particolare rapporto preferenziale); dall'altra, anche a parità di frequenza osservativa, l'esistenza dei legami relazionali attribuisce a tali comportamenti un peso evidenziale superiore rispetto a quello connesso ai comportamenti degli individui 'anonimi' (cfr. ad esempio Raub e Weesie (1990)). Anche una differenziazione relativamente 'debole' in termini di intensità relazionale preferenziale può produrre sotto certe condizioni effetti aggregati rilevanti (cfr. Granovetter (1973)).

Possiamo allora immaginare una rappresentazione molto semplificata ed idealizzata della topologia relazionale in termini di un reticolo di punti equidistanti sul quale definiamo una semplice 'struttura di vicinato': ciascun punto ha come propri 'vicini' gli otto punti adiacenti e corrispondenti alle

posizioni N, S, E, O, NE, NO, SE, SO (la notazione è quella standard dei punti cardinali; cfr. Fig. 15). Se a ciascun punto viene associato un individuo, la struttura di vicinato identifica l'insieme dei soggetti 'importanti' con i quali ciascuno interagisce preferenzialmente. A posizioni vicine corrispondono un certo numero di 'vicini' in comune, ma l'insieme dei vicini non è mai esattamente lo stesso per due posizioni distinte; questa proprietà riflette almeno in parte la topologia delle relazioni di parentela. Per semplicità si suppone solitamente che il numero di soggetti (e quindi il reticolo relazionale) sia finito; per i soggetti che si trovano sul 'bordo' destro (sinistro) dello spazio si conviene allora che i 'vicini di destra' (sinistra) siano dati dai soggetti che si trovano sulla posizione corrispondente del bordo sinistro (destro); ipotesi analoghe valgono per i soggetti posti sul bordo superiore (inferiore). Si veda a questo riguardo la Fig 16. In altre parole, i bordi opposti del reticolo relazionale vengono di fatto 'incollati' finendo per formare una ciambella (ovvero, con una terminologia geometrica più precisa, un toro) nello spazio tridimensionale. Ma in che misura una determinata topologia relazionale può avere un effetto condizionante sui comportamenti? In prima approssimazione, è chiaro che l'interazione ricorrente con un certo numero di individui che manifestano una determinata regolarità comportamentale finisce per avere un effetto condizionante, che può agire tanto nel senso della conformazione a tale regolarità che nel senso della sua negazione. Possono così venirsi o meno a determinare delle 'isole' comportamentali stabili all'interno del reticolo relazionale, le quali identificano configurazioni relativamente 'robuste' *condizionalmente* alle modalità di interazione: la 'fissazione' locale di un determinato comportamento in una configurazione stabile all'interno dello spazio relazionale crea le premesse per la sua riproduzione nel tempo; in alternativa, si può assistere all'emergere di configurazioni 'oscillatorie' nelle quali la diffusione locale di un determinato comportamento induce un certo numero di individui a 'saltare' verso comportamenti alternativi agli istanti successivi. Nel primo caso abbiamo quindi a che fare con meccanismi di trasmissione di tipo 'massa critica' (cfr. ad esempio Granovetter (1978)), nei quali maggiore è il numero di individui che adottano un determinato comportamento, maggiore è l'incentivo all'adozione da parte degli altri individui. Nel secondo, con meccanismi di tipo 'distributivo' (cfr. ad esempio Huberman e Hogg (1988)), nei quali l'adozione diffusa di un determinato comportamento crea un effetto di 'congestione' che induce un certo numero di individui a 'riallocarsi' verso comportamenti alternativi ma in qualche senso 'complementari' al primo (cfr.

Sacco (1994) per alcuni esempi illustrativi).

Da un punto di vista analitico, la struttura relazionale ‘spazializzata’ appena descritta può essere rappresentata come un automa cellulare (cfr. Wolfram (1986)). Essenzialmente, un automa cellulare è un sistema dinamico definito su un reticolo nel quale il valore assunto dalla variabile di stato in un determinato momento in un particolare nodo del reticolo è una funzione dei valori assunti dalla variabile all’istante precedente nel nodo stesso e in quelli adiacenti. La legge di evoluzione che definisce l’automa è la stessa per tutti i contesti locali; ciò che varia la *configurazione* di comportamenti su cui essa si trova ad agire da caso a caso (cfr. l’Appendice alla fine di questo lavoro). La dinamica globale dell’automa è così determinata dalla ‘somma’ di un gran numero di ‘interazioni di vicinato’ tra soggetti adiacenti all’interno della topologia relazionale: ciascun soggetto osserva il comportamento degli individui a lui ‘prossimi’ e aggiorna il proprio comportamento all’istante successivo secondo un criterio prefissato che può incorporare in proporzioni variabili norme di razionalità economicamente e/o socialmente motivate. Alla tipologia dei possibili criteri di aggiornamento adottati degli individui corrisponde così una tipologia di ‘agenti’ motivazionalmente identificati. In questo saggio presenteremo i risultati dell’applicazione di questa metodologia generale di analisi allo studio di un problema specifico ma estremamente rilevante: quello dell’azione collettiva in un contesto di ‘dilemma sociale’ (cfr. ad esempio Olson (1965)).

## 2 Azione collettiva e dilemmi sociali

La modellizzazione delle situazioni di ‘dilemma sociale’ come dilemma del prigioniero ad  $n$  persone ha una lunga tradizione. All’interno della sterminata letteratura sull’argomento va ricordato quantomeno Schelling (1978), nel quale viene introdotta una tecnica particolarmente comoda di visualizzazione della struttura dei *payoff* dei vari tipi di giocatori in funzione del numero di giocatori che adottano la strategia cooperativa. Elster (1989) fa largo uso dell’analisi grafica di Schelling per discutere una interessante tassonomia di ‘agenti’ che presenta una notevole varietà di tipi motivazionali. La tassonomia di Elster costituirà la base della nostra analisi successiva, ed è quindi opportuno discuterla più dettagliatamente.

La struttura generale del dilemma del prigioniero ad  $n$  persone è molto

semplice. Definiamo *esito non-cooperativo* la situazione nella quale nessuno degli  $n$  agenti coopera, ed *esito cooperativo* quella in cui tutti ed  $n$  gli agenti cooperano. La più ovvia generalizzazione del semplice dilemma del prigioniero a 2 persone al caso a  $n$  persone richiede fundamentalmente che:

- a) l'esito cooperativo Pareto-domini l'esito non cooperativo;
- b) nessun individuo abbia un incentivo a deviare *unilateralmente* dalla non-cooperazione (NC) alla cooperazione (C) qualunque sia il numero dei cooperatori. Come osserva Elster, le condizioni a) e b) non implicano però necessariamente che il benessere sociale o anche individuale aumenti necessariamente con il numero di cooperatori. Possono darsi casi in cui esiste una 'soglia ottimale superiore di cooperazione' oltre la quale un ulteriore aumento del numero di cooperatori finisce per ridurre il beneficio marginale della cooperazione (tanto per gli individui C che per gli individui NC).

Se consideriamo individui la cui struttura motivazionale prevede soltanto una dimensione razionale-economizzante, cioè i tipici individui *self-interested* della teoria economica tradizionale, la loro scelta ottimale sarà naturalmente quella di scegliere sempre e comunque la non cooperazione quale che sia il comportamento degli altri individui, in quanto questa, grazie alla condizione b), assicura sempre e comunque un payoff superiore alla cooperazione quale che sia la scelta degli altri. In assenza di una dimensione di razionalità 'sociale' che inserisca nella struttura motivazionale norme comportamentali di natura meno unilaterale, l'analisi non presenta particolari motivi di interesse e di novità. E' tuttavia possibile considerare strutture motivazionali più complesse, che 'mediano' tra incentivi di natura monetaria e relazionale. Una prima importante distinzione a questo proposito ha a che fare con la natura consequenzialista oppure non-consequenzialista delle motivazioni etero-dirette: nella misura in cui un individuo ritiene giusto o conveniente o doveroso cooperare sotto determinate condizioni, è necessario chiedersi se la sua scelta tiene o meno in qualche considerazione l'*effetto* che essa produce sul benessere degli altri individui. Un soggetto 'orientato cooperativamente' ma consequenzialista sarebbe infatti disposto a rinunciare alla cooperazione qualora si accorgesse che il beneficio sociale marginale della sua scelta è negativo, mentre un soggetto non consequenzialista avrebbe come unico riferimento la propria norma di condotta a prescindere dagli effetti che essa produce sul benessere altrui.

Tenendo in mente questa distinzione fondamentale, possiamo introdurre una ulteriore dimensione tassonomica osservando che le motivazioni etero-

dirette possono obbedire ad un qualche tipo di norma comportamentale kantiana (agisci ‘come vorresti tutti facessero’ indipendentemente da quello che gli altri fanno) oppure a norme condizionali di tipo conformistico (coopera soltanto se la maggior parte degli altri lo fa), oppure anti-conformistico (coopera soltanto se sei ‘uno dei pochi’). E’ naturalmente possibile considerare altri schemi motivazionali. Seguendo Elster, noi ci limitiamo qui ad approfondire i casi generati da questa griglia di riferimento.

Una norma kantiana di orientamento non-consequenzialista prescrive la cooperazione indipendentemente dal beneficio marginale (individuale e sociale) che questa comporta. Elster parla in questo caso di ‘kantismo di ogni giorno’: se l’esito cooperativo è Pareto-superiore a quello non cooperativo, è desiderabile che tutti gli individui scelgano di agire cooperativamente; pertanto, un agente kantiano non-consequenzialista sceglierà comunque di cooperare in tali circostanze. Una norma kantiana di orientamento consequenzialista richiede invece che la decisione di cooperare sia subordinata alla valutazione dell’impatto che tale scelta produce sul benessere degli altri soggetti. Elster identifica questi soggetti come ‘utilitaristi’; per la precisione, il sistema motivazionale di questo tipo di agenti coinciderà con quello di un pianificatore sociale utilitarista che valuta il benessere collettivo come somma dei benessere individuali<sup>1</sup>. Pertanto, un soggetto utilitarista nel senso appena precisato sarà indotto a cooperare soltanto se il beneficio sociale marginale indotto dalla sua decisione sarà positivo.

Un’altra classe di sistemi motivazionali etero-diretti ha a che fare non tanto con lo status etico della scelta quanto piuttosto con il suo grado di conformità. Possiamo così definire una norma di cooperazione condizionata al numero di cooperatori effettivamente osservati; Elster parla in particolare di ‘norma di imparzialità’ quando la prescrizione di cooperare è condizionata al fatto che il numero di cooperatori osservati sia pari almeno ad un valore  $k$  predefinito. Si definisce così un’intera famiglia di norme di cooperazione conformiste condizionate al valore di  $k$ ; la motivazione di tipo conformistico sarà naturalmente tanto più preponderante quanto più elevato  $k$ . Accanto a questo tipo di norma si può considerare una norma di cooperazione di tipo elitistico che prescrive la cooperazione soltanto nella misura in cui il

---

<sup>1</sup>Bisogna pertanto distinguere i soggetti utilitaristi dotati di motivazioni etero-dirette dai soggetti *self-interested* il cui unico metro di valutazione è il proprio beneficio individuale.

soggetto percepisca la sua scelta di cooperazione come un atto relativamente isolato che lo differenzia dalla maggioranza degli altri individui: si tratta in altre parole di una norma di cooperazione non-conformista. Una norma che prescrive comportamenti analoghi partendo da una base motivazionale differente è quella della cooperazione di base. Si tratta in questo caso di una norma di cooperazione condizionata sì essenzialmente al numero di cooperatori, ma alla stesso tempo consequenzialisticamente orientata: sapendo che la cooperazione può essere in qualche modo impedita dal mancato raggiungimento di una determinata ‘soglia critica’ di cooperatori, i cooperatori di base sono motivati a cooperare soltanto nella misura in cui il raggiungimento della soglia critica minima necessaria alla sopravvivenza della cooperazione è messo in discussione; di fatto, questo tipo di soggetti finirà quindi per cooperare quando il numero osservato di cooperatori è relativamente piccolo, così come nel caso degli elitisti.

Nella sua analisi, Elster discute informalmente le dinamiche sociali osservabili all’interno di una ‘popolazione’ di soggetti che comprende tutti i tipi motivazionali sopra descritti; vengono così delineati alcuni semplici ed intuitivi scenari nei quali la cooperazione riesce o meno ad affermarsi a seconda dell’interazione che si viene a produrre tra le motivazioni dei vari tipi ed in particolare a seconda dei ‘tempi di attivazione’ delle varie norme di cooperazione: uno scenario plausibile di affermazione sociale della cooperazione è ad esempio quello in cui i kantiani non consequenzialisti ‘accendono la miccia’ decidendo di cooperare incondizionalmente; intervengono quindi i cooperativisti elitari e di base a dar loro man forte e quindi, presumibilmente, gli utilitaristi ed infine i cooperativisti via via più conformisti, ecc. Si noti che, man mano che la cooperazione si diffonde, alcuni tipi comportamentali possono essere indotti a non cooperare più qualora la loro motivazione venga meno (si pensi ad esempio agli elitisti e ai cooperatori di base). Ciò non dovrebbe tuttavia compromettere la sopravvivenza della cooperazione ammesso che nel sistema operi un numero sufficiente di individui il cui tipo motivazionale ‘sostiene’ la scelta cooperativa una volta che questa si è diffusa (kantiani consequenzialisti e non, conformisti): in caso affermativo, il sistema si stabilizzerà su un ‘tasso di cooperazione’ significativamente diverso da zero.

Per verificare se ed in che misura queste conclusioni stilizzate ed intuitive siano realmente rappresentative del comportamento dinamico del modello, e per procedere ad una più precisa individuazione delle condizioni critiche dalle quali dipende l’osservazione di un particolare scenario, occorre pro-

cedere ad una analisi più formalizzata. E' inoltre abbastanza irrealistico postulare, come fa Elster, che le interazioni tra i vari soggetti avvengano in una sorta di *vacuum* relazionale nel quale ciascun soggetto interagisce contemporaneamente con tutti gli altri. Una simile ipotesi tende presumibilmente a generare una eccessiva uniformità di comportamento in quanto l'unico elemento che caratterizza i singoli individui è il tipo motivazionale; due individui motivazionalmente omogenei sono pertanto indistinguibili all'interno del modello. Introducendo una qualche forma elementare di topologia relazionale che dà a ciascun soggetto la possibilità di una interazione privilegiata, ed al limite esclusiva, con un numero limitato di soggetti 'per lui importanti' è possibile distinguere individui motivazionalmente omogenei in base alla loro 'posizione' all'interno del sistema sociale, dando luogo a configurazioni comportamentali eterogenee pur in presenza di un repertorio comportamentale comune e accessibile a tutti gli appartenenti ad un determinato tipo. Potrà così accadere ad esempio che il comportamento cooperativo sopravviva 'localmente' all'interno di un ambiente tendenzialmente 'ostile', grazie all'effetto di reciproco sostegno esercitato dal comune orientamento cooperativo dei componenti della singola 'famiglia'. Ciò spingerà gli individui di un determinato tipo motivazionale ad attivarsi cooperativamente, mentre in altri contesti locali individui dello stesso tipo non saranno indotti a cooperare a causa di una presenza eccessiva o troppo scarsa di 'parenti' cooperatori. Ciò spiega come 'isole' di cooperazione possano sotto certe condizioni essere osservate anche all'interno di un contesto sociale nel quale dominano sistemi motivazionali avversi alla cooperazione o poco compatibili dal punto di vista della sua diffusione sociale.

Nell'analisi che segue procederemo quindi a riformulare il modello di Elster in termini della semplice topologia relazionale introdotta nella sezione 1. Il contesto più generale che può essere analizzato, in linea con la discussione di Elster, è quello di una popolazione completamente mista nella quale convivono tutti i tipi motivazionali precedentemente introdotti. Tuttavia, questo tipo di analisi pone alcune difficoltà di natura tecnico-computazionale in quanto richiede la definizione e l'implementazione su calcolatore di automi cellulari più complessi di quelli tipicamente considerati dalla letteratura, ed in particolare di automi 'anisotropi' nei quali ciascun nodo può essere caratterizzato da una propria legge locale di aggiornamento diversa da quella degli altri nodi (vedi discussione in Appendice). Pertanto, in questo lavoro preliminare ci limiteremo a considerare il caso di popolazioni omogenee composte

da individui accomunati da uno stesso sistema motivazionale. Si tratta naturalmente di una drastica semplificazione, che rende in genere molto più problematica la diffusione della cooperazione rispetto al caso di una popolazione motivazionalmente eterogenea. L'eterogeneità delle caratteristiche individuali ha infatti tipicamente un effetto di 'stabilizzazione' sulla dinamica aggregata rispetto al caso di una popolazione omogenea (cfr. ad esempio Huberman e Hogg (1988)). D'altra parte, rispetto al contesto analitico analizzato da Elster si introduce qui una importante differenza riguardo alle condizioni iniziali, supponendo in particolare che la scelta iniziale di ciascun individuo sia determinata casualmente (o, se si preferisce, sia il risultato di precedenti esperienze non esplicitamente descritte dal modello e quindi esogenamente fissate): l'eterogeneità iniziale dei comportamenti può allora, anche in presenza di un sistema motivazionale comune a tutti i soggetti, produrre sotto certe condizioni una variabilità informazionale sufficiente alla diffusione sociale o quantomeno alla sopravvivenza locale della cooperazione. Per quanto ampiamente generalizzabile, la nostra analisi della dinamica sociale della cooperazione in popolazioni motivazionalmente omogenee può essere vista come uno studio delle potenzialità cooperative 'intrinseche' di ciascun tipo motivazionale, astruendo cioè dai meccanismi di sostituibilità o complementarità strategica che possono instaurarsi quando più tipi diversi vengono a contatto.

### **3 Dinamiche sociali della cooperazione in popolazioni motivazionalmente omogenee**

Quando si considerano popolazioni omogenee dal punto di vista motivazionale, la specificazione della struttura dei payoff può essere più o meno rilevante a seconda del fatto che la norma di cooperazione sia definita sulle conseguenze delle scelte individuali piuttosto che sulla frequenza delle scelte stesse all'interno della popolazione (locale). Nel caso di una popolazione di soggetti 'kantiani di ogni giorno' e quindi non consequenzialisti, la struttura dei payoff conta soltanto nella misura in cui l'esito cooperativo si rivela Pareto-superiore a quello non cooperativo. Quando questa condizione è rispettata, qualunque struttura di payoff è compatibile con l'affermazione

completa della cooperazione. Nel caso specifico del kantismo di ogni giorno una simile conclusione appare però quasi tautologica in quanto esso definisce la sua prescrizione comportamentale proprio in termini della valutazione comparativa di esiti aggregati omogenei (tutti cooperano oppure nessuno coopera), ed è quindi particolarmente efficace dal punto di vista del potenziale cooperativo in un contesto nel quale tutti i soggetti condividono questo particolare tipo di premesse motivazionali. Pertanto, quale che sia la distribuzione iniziale (casuale) delle scelte dei vari soggetti, nell'istante decisionale successivo tutti i soggetti optano per la cooperazione qualora l'esito cooperativo sia superiore a quello non cooperativo, e per la non cooperazione nel caso contrario. Nel caso delle norme di cooperazione di tipo conformistico, invece, la questione è più complessa. Qui la determinazione della dinamica sociale dei comportamenti prescinde in via di principio dalla struttura dei payoff in quanto, formalmente, ciò che conta nel definire le scelte individuali è solo il numero di cooperatori (e non cooperatori) precedentemente osservato. D'altra parte sembra abbastanza irragionevole supporre che una determinata norma di imparzialità ('coopera solo se hai osservato cooperare almeno  $k$  individui della tua "famiglia"') venga definita in modo del tutto arbitrario ed in particolare indipendente dalle conseguenze sociali delle scelte individuali. Si può allora supporre che il valore di  $k$  coincida con il numero minimo di cooperatori che assicurano a questi un payoff individuale superiore a quello corrispondente alla uniforme non-cooperazione (quella che Elster chiama la soglia per la cooperazione autosufficiente). Se normalizziamo a zero il payoff dell'esito non-cooperativo, il valore di  $k$  può ad esempio essere determinato come in Fig. 1. Nell'esempio riportato in figura si è supposto che il beneficio marginale della cooperazione cresca uniformemente con il numero dei cooperatori. Un risultato del tutto analogo si ottiene per qualunque struttura dei payoff che assicura alla cooperazione un valore positivo quando il numero dei cooperatori è superiore a  $k$ , anche qualora il beneficio sociale marginale di un cooperatore aggiuntivo sia negativo.

[Figura 1 approssimativamente qui]

Fig. 1. *Determinazione della norma di imparzialità in termini della soglia di cooperazione autosufficiente.*

Supponiamo ora che tutti gli individui all'interno della popolazione si attingano ad una stessa norma di imparzialità che prescrive di cooperare solo se almeno  $k$  individui all'interno della 'famiglia' hanno cooperato nel corso dell'iterazione precedente, dove  $k$  è determinato dalla struttura del payoff come in Fig. 1. Partendo da una distribuzione iniziale casuale dei comportamenti possiamo quindi determinare come varia il 'potenziale cooperativo' di questo tipo motivazionale al variare di  $k$ , ovvero del grado di conformismo implicito nella norma. Si ricordi che la 'famiglia' di ciascun soggetto (ovvero l'insieme dei soggetti le cui azioni vengono osservate e hanno un impatto sulle scelte del soggetto decisore) è composta da 9 elementi compreso il decisore; con riferimento alla Fig. 1, pertanto,  $n = 9$ . Si ottengono i seguenti risultati:

- se  $k$  è maggiore o uguale a 7, nessun individuo sceglie di cooperare in equilibrio: la dinamica sociale cancella qualunque propensione cooperativa per una generica distribuzione iniziale casuale delle scelte individuali. Se dunque la norma di imparzialità è esageratamente conformistica (ovvero se i benefici sociali della cooperazione cominciano ad avvertirsi soltanto per un numero di cooperatori molto elevato) la diffusione sociale della cooperazione diviene praticamente impossibile anche in ambiti locali limitati (Fig. 2). In questo caso la sopravvivenza della cooperazione richiede necessariamente l'intervento di un tipo motivazionale 'complementare' che agisce cooperativamente anche in condizioni ambientali sfavorevoli.

- se  $k = 6$  possono emergere, seppure raramente, isole di cooperazione che presentano una tipica struttura a 'striscia' (o meglio, a 'nastro', date le condizioni toroidali al contorno che si sono assunte); condizione necessaria affinché tali configurazioni possano essere osservate è che nella distribuzione iniziale delle scelte tali 'strisce' siano già colonizzate quasi esclusivamente da comportamenti cooperativi (Fig. 3a). In caso contrario, la cooperazione scompare in equilibrio (Fig. 3b). Siamo qui in presenza di una norma ancora notevolmente conformista; tale norma si rivela incapace di 'creare' nuova cooperazione in contesti in cui il numero di cooperatori è relativamente scarso ma soltanto di 'difendere' la cooperazione esistente se le condizioni ambientali locali sono particolarmente favorevoli (ovvero se il numero iniziale di cooperatori è localmente molto elevato).

- se  $k = 5$  si osservano abbastanza frequentemente 'isole' di cooperazione più o meno grandi e numerose a seconda delle condizioni iniziali. Più raramente si assiste alla comparsa di 'strisce' di cooperazione come nel caso precedente o anche alla scomparsa totale della cooperazione. Come ci si

poteva aspettare, man mano che la norma di imparzialità diviene meno conformista il suo potenziale cooperativo tende ad aumentare, portando alla comparsa di isole di cooperazione più robuste e diffuse (Fig. 4).

– se  $k = 4$  si assiste alla comparsa di grandi regioni di cooperazione. La cooperazione può addirittura colonizzare l'intera popolazione qualora ciascuna 'striscia' di spazio relazionale contenga almeno un individuo che sceglie inizialmente di agire cooperativamente. In modo del tutto simmetrico al caso  $k = 6$ , abbiamo qui che una norma di imparzialità moderatamente conformistica è in grado di 'creare' nuova cooperazione dovunque essa sia inizialmente presente, anche se in misura limitata (Fig. 5a,b).

– se  $k$  è minore o uguale a 3, tutti gli individui cooperano in equilibrio per una generica scelta delle condizioni iniziali. Se la norma di imparzialità è debolmente conformistica, la cooperazione ha sempre buon gioco; si noti che il caso  $k = 0$  produce un esito equivalente a quello di una norma kantiana non consequenzialista (con la differenza che qui una giustificazione tendenzialmente consequenzialista del valore  $k = 0$  nella logica della Fig. 1 obbliga a supporre che il beneficio individuale della cooperazione sia sempre non negativo, ovvero non inferiore al payoff dell'esito non cooperativo).

Nel caso di norme di cooperazione anti-conformiste di tipo elitista (o di norme consequenzialiste equivalenti come la cooperazione di base) una giustificazione della soglia (in questo caso superiore) di cooperazione in termini della struttura di payoff diventa più problematica in quanto presumibilmente il valore della cooperazione tenderà a crescere quando il numero dei cooperatori supera un certo livello minimo. I risultati simulativi mostrano in realtà che, qualora la popolazione sia composta esclusivamente di cooperatori elitisti che cooperano se e solo se non più di  $h$  individui della 'famiglia' hanno cooperato all'iterazione precedente, per valori ragionevoli di  $h$ , ovvero  $h$  da 1 a 6 (per  $h = 7$  comincia a diventare arduo sostenere che la scelta cooperativa sia sostenuta da motivazioni di tipo elitario), il livello effettivo della soglia non è poi così importante: si ottiene sempre un comportamento decisamente caotico, oppure caratterizzato da una ciclicità al livello globale (si alternano periodi di cooperazione e non cooperazione generalizzata). Al livello individuale e locale si osservano così violente oscillazioni tra cooperazione e non cooperazione che possono estendersi inalterate al livello aggregato oppure possono combinarsi in modo complesso dando luogo ad una persistente 'turbolenza' comportamentale che interessa l'intera popolazione. Se poi la norma elitista viene ulteriormente 'rafforzata' da una prescrizione iper-elitista

(‘coopera anche se nessun altro lo fa’) allora la dinamica aggregata tende a regolarizzarsi entro certi limiti dando luogo con certezza a fenomeni di tipo oscillatorio (Fig. 6a,b). La ragione di questo risultato è abbastanza intuitiva: nelle aree in cui si osserva inizialmente poca cooperazione, la norma elitista spinge i non cooperatori a cooperare; quando d’altra parte la cooperazione si diffonde troppo, la stessa norma spinge verso la non cooperazione, creando così un continuo ‘rimescolamento’ che preclude la possibilità di formazione di configurazioni stabili. Anche qui l’introduzione di un tipo motivazionale complementare potrebbe essere utile ai fini di una stabilizzazione; va tuttavia osservato che la presenza di soggetti elitisti preclude sempre per definizione una affermazione completa e definitiva della cooperazione. Resta infine da considerare il caso dei soggetti utilitaristi, ovvero dei soggetti kantiani con orientamento consequenzialista. Per questo tipo motivazionale il contenuto della norma di cooperazione dipende in modo pressoché esclusivo dalla struttura dei payoff: in particolare, essi coopereranno se e solo se ciò produce un aumento del payoff dei cooperatori. Se ad esempio il valore della cooperazione aumenta uniformemente col numero dei cooperatori come in Fig. 1, gli utilitaristi coopereranno sempre e comunque e saranno quindi di fatto indistinguibili dai soggetti kantiani non consequenzialisti. Se però un aumento marginale della cooperazione tende ad essere controproducente quando il numero dei cooperatori è eccessivamente basso o eccessivamente elevato come in Fig. 7, gli utilitaristi finiscono per cooperare se e solo se il numero osservato dei cooperatori è compreso tra una soglia minima  $k$  e una soglia massima  $h > k$ .

[Figura 7 approssimativamente qui]

Fig. 7. *Funzione nonlineare di payoff con soglia minima e massima di cooperazione per soggetti utilitaristi.*

In tal caso, ciò che si osserva in genere, come nel caso degli elitisti, è una dinamica sociale caotica nella quale ciascun individuo continua imprevedibilmente ad oscillare tra la cooperazione e la non cooperazione. Pur in presenza di un sistema motivazionale fortemente orientato alla cooperazione, e per di più in senso consequenzialista, la mancata affermazione di una configu-

razione cooperativa stabile va qui attribuita in ultima analisi ad un problema di coordinamento: in presenza di un elevato livello locale di cooperazione gli utilitaristi tendono a percepire la loro eventuale scelta cooperativa come inefficiente e si astengono dal cooperare; ma ciò finisce per abbassare drammaticamente il livello della cooperazione inducendo di nuovo alcuni a cooperare, ecc. A differenza del caso elitista, tuttavia, il fatto che gli utilitaristi possano non essere portati a cooperare per livelli localmente bassi di cooperazione può addirittura portare alla totale scomparsa della stessa. Se ad esempio la struttura dei payoff è tale da indurre una soglia minima  $k$  di cooperazione troppo elevata, l'osservazione di un ammontare eccessivo di cooperazione può far sì che un numero ingente di soggetti sia portato a non cooperare. Se il numero dei cooperatori scende ovunque sotto la soglia minima, la quantità di cooperatori osservata localmente diviene troppo piccola per giustificare la cooperazione (il cui beneficio marginale viene ad essere negativo) e il sistema viene così ad essere intrappolato in un equilibrio non cooperativo (o, nel migliore dei casi, in un equilibrio con piccole, sporadiche isole di cooperazione). In questo caso l'orientamento consequenzialista non garantisce la sopravvivenza della cooperazione in quanto il punto di vista di ciascun soggetto è troppo limitato. Esso fa esclusivamente riferimento all'impatto marginale della propria scelta di cooperare senza tenere in alcun conto la possibilità di un coordinamento delle scelte individuali. Se gli individui si rendessero conto che l'instabilità della cooperazione dipende soltanto da un inefficiente 'sfasamento' delle proprie risposte individuali e 'meta-cooperassero' nel senso di divenire meno reattivi alla variazione delle condizioni locali, imparando a valutare gli effetti dinamici della loro scelta di cooperare o meno attraverso la ripercussione che questa esercita sulle scelte degli altri soggetti, essi tenderebbero a cooperare anche quando il numero dei cooperatori è 'troppo' (o troppo poco) elevato, favorendo così una stabilizzazione del comportamento cooperativo. Se ad esempio  $k = 5$  e  $h = 7$ , la cooperazione sparirà del tutto per una scelta generica delle condizioni iniziali: la soglia inferiore di cooperazione è troppo elevata per garantirne la sopravvivenza (Fig. 8). Se  $h$  sale a 8, diviene occasionalmente possibile osservare la formazione di piccole isole di cooperazione (Fig. 9a,b). Se in aggiunta  $k$  scende a 4, si assiste alla comparsa del caos interrotto da 'strisce' di non cooperazione: qualora queste siano inizialmente presenti nella distribuzione iniziale dei comportamenti, esse resistono rivelandosi 'impermeabili' alla cooperazione. Quando  $k$  scende a 3 il caos diviene generalizzato e inevitabile. Al limite, quando

$k$  tende a 1, ovvero quando il beneficio marginale della cooperazione tende ad essere positivo anche per livelli di cooperazione localmente bassi, si ricade di fatto in un caso equivalente a quello elitistico e quindi il prevalere del caos non può sorprendere (Fig. 10-14). In conclusione, abbiamo qui che il potenziale cooperativo delle norme etero-dirette di tipo kantiano tende paradossalmente ad essere maggiore quando queste sottendono un orientamento non consequenzialista o al massimo moderatamente consequenzialista (coopera se il vantaggio sociale netto è positivo rispetto all'esito non cooperativo); quando invece l'orientamento soggiacente è fortemente consequenzialista (coopera solo se il vantaggio sociale marginale netto è positivo) la cooperazione diviene più problematica in quanto le valutazioni soggettive di opportunità devono scontare la limitatezza del punto di vista individuale che osserva soltanto le condizioni locali e non è in grado di tenere conto delle ripercussioni che le proprie decisioni producono a livello aggregato. In altre parole, in presenza di dinamiche aggregate complesse l'orientamento non consequenzialista si rivela più 'sicuro' e affidabile in quanto non ha bisogno di tenere in alcun conto il grado individuale di razionalità.

## 4 Prospettive

Non c'è quasi bisogno di ricordare che i risultati relativi a popolazioni 'motivazionalmente omogenee' riportati nella sezione precedente sono di un qualche interesse soltanto se intesi come punto di partenza per una analisi più generale riferita a popolazioni eterogenee e, possibilmente, a tipologie di interazione meno schematiche<sup>2</sup> <sup>3</sup>. Bisogna tuttavia notare che tali risultati forniscono comunque delle indicazioni significative circa le possibili direzioni

---

<sup>2</sup>Non soltanto le modalità di interazione, ma anche la dimensione dei gruppi 'familiari' ha tipicamente effetti importanti in termini di potenziale cooperativo. Diversamente da quanto comunemente ritenuto, tuttavia, non è necessariamente vero che un allargamento della dimensione del gruppo implichi necessariamente una riduzione del potenziale cooperativo. In una serie di lavori, Oliver et al. (1985), Oliver et al. (1988), e Marwell, Oliver e Prahl (1988) sviluppano un interessante approccio analitico focalizzato sull'interdipendenza tra modalità di interazione e dimensione del gruppo di riferimento nella determinazione della dinamica sociale della cooperazione.

<sup>3</sup>Considerando schemi di interazione asimmetrici si assiste alla generazione di relazioni di potere che possono a loro volta divenire un fattore causale determinante dal punto di vista della dinamica sociale. Cfr. ad esempio Yamagishi et al. (1988).

di sviluppo della ricerca futura. In particolare, le dinamiche sociali qui analizzate si riferiscono ad un orizzonte temporale di breve/medio periodo nel quale le condizioni ambientali esterne possono essere ritenute presumibilmente costanti. Se si ammette che, ad esempio, le scelte dei vari soggetti possano essere periodicamente ‘perturbate’ da shocks esogeni sistematici, le proprietà dinamiche del modello possono subire cambiamenti anche notevoli. Si è mostrato a tale proposito che l’interazione tra dinamiche localizzate e shock esogeni può in determinati contesti dar luogo a forme di auto-organizzazione estremamente complesse quali la criticità auto-organizzata (cfr. Bak et al. (1988), Bak et al. (1989)), la quale corrisponde ad uno stato del sistema caratterizzato dalla capacità di ‘reagire in modo flessibile ma ordinato’ alle sollecitazioni esterne. In breve, in una situazione di criticità auto-organizzata le ripercussioni a livello aggregato di una data perturbazione di natura ‘locale’ possono avere una estrema varietà di raggi di azione: da quello puramente locale relativo ai vicini immediati dei soggetti direttamente interessati a quello super-sistemico della intera popolazione; inoltre, maggiore è il raggio di azione di una determinata perturbazione, minore è la sua probabilità di manifestarsi. Questo naturalmente è quanto accade in una società complessa nella quale il carattere prevalentemente locale dell’interazione non pregiudica la possibilità che una variazione di certi comportamenti individuali produca eccezionalmente delle ripercussioni ‘macroscopiche’, che saranno appunto di norma tanto più eccezionali quanto maggiore è la loro portata. In ultima analisi, la complessità di un sistema sociale è data proprio dalla ricchezza e dalla flessibilità delle risposte che esso riesce a produrre a seguito di sollecitazioni ‘esterne’, e quindi in ultima analisi dalla sua capacità di adattamento a un ambiente mutevole. La possibilità di operare all’interno di un sistema la cui dinamica aggregata presenta elementi significativi di ‘organizzazione’ e quindi, entro certi limiti, di prevedibilità, è di estremo interesse anche dal punto di vista relativamente limitato delle popolazioni omogenee analizzate in precedenza. Si consideri ad esempio il caso dei soggetti kantiani di orientamento consequenzialista. Si è visto come l’inefficienza degli esiti collettivi generati da questa tipologia motivazionale dipende sostanzialmente dalla incapacità individuale di prevedere le ripercussioni aggregate delle proprie scelte con la conseguente comparsa di un coordinamento inefficiente oppure anche di una configurazione stabile di tipo non-cooperativo. In presenza di shocks esogeni più o meno regolari diviene possibile, per i soggetti in precedenza ‘intrappolati’ in una routine di coordinamento errata e basata

unicamente sulla valutazione miope del valore sociale delle proprie scelte individuali, passare ad una sincronizzazione più efficiente quando l'azione dello shock esogeno perturba la loro scelta. L'azione dello shock può o meno essere risolutiva: nei casi più fortunati, essa può, attraverso la concatenazione delle interazioni locali, alterare significativamente le scelte dei soggetti lungo un raggio d'azione molto ampio e per periodi lunghi; in altri casi, essa finisce per esaurire presto la sua azione con effetti tutto sommato irrilevanti. In ogni caso, questa situazione di 'caos debole' nel quale le interazioni a largo raggio sono possibili ma relativamente improbabili rende ora possibile per i soggetti la formazione di aspettative relativamente affidabili circa le ripercussioni sistemiche delle loro scelte, cosa assolutamente impossibile nella situazione di 'caos forte' analizzata nella sezione 3 dove qualunque scelta finiva per interagire in modo sostanzialmente imprevedibile con quella di tutti gli altri soggetti. Ma con la possibilità di aspettative coerenti e corrette nasce la possibilità di accedere a livelli di razionalità superiori nei quali l'orientamento consequenzialista si traduce in una consapevole capacità di ottimizzare le proprie scelte alla luce delle loro ripercussioni sociali attese. Si apre così un campo di ricerca nuovo e stimolante nel quale motivazioni *self-interested* ed etero-dirette competono tra loro e si interfacciano con una molteplicità di livelli di razionalità individuale; diviene così in particolare possibile analizzare in che misura, ed eventualmente sotto quali condizioni, una razionalità individuale più o meno articolata è in grado di 'servire' efficientemente un determinato tipo motivazionale, favorendo l'emergere degli esiti più desiderabili sulla base delle preferenze ad esso associate. Non è infatti detto, in via di principio, che, ai fini del raggiungimento degli esiti sociali preferiti, agli 'altruisti' e agli 'egoisti' convenga sempre e comunque ricorrere a calcoli il più possibile sofisticati nella determinazione delle proprie scelte. La risposta dipende sostanzialmente dalle motivazioni e dalla razionalità dei soggetti con cui ci si trova ad interagire: questo programma di ricerca contiene dunque molti significativi spunti per una futura 'ecologia sociale' dei comportamenti, delle motivazioni e delle tecnologie decisionali.

## 5 Appendice

In questa sezione intendiamo fornire al lettore interessato alcuni elementi di base della teoria degli automi cellulari (AC).

Va prima di tutto detto che gli AC sono *sistemi dinamici nel tempo discreto*, nel senso che lo stato di questi sistemi in un dato istante dipende, secondo una qualche funzione  $f$ , dallo stato del periodo precedente:

$$y_{t+1} = f(y_t) \tag{1}$$

Poiché gli AC sono composti da un insieme di  $N$  unità elementari (*sites*) disposte secondo una qualche topologia, lo stato (o configurazione) dell'intero automa è rappresentato da un vettore  $y_t$  i cui  $N$  elementi indicano lo stato  $x_t^i$  di ogni singola unità nell'istante  $t$ .

Se indichiamo con  $S$  l'insieme dei possibili stati di ogni unità o cella ( $x^i \in S$ ) e poniamo  $Z = \{1, \dots, N\}$ , lo stato dell'AC è il vettore  $y = \{x^i\}_{i \in Z}$  e lo spazio degli stati è l'insieme:

$$X = S_K^Z = \{y = \{x^i\}_{i \in Z} : x^i \in S, \forall i \in Z\}.$$

Un secondo importante carattere degli AC è che la legge di evoluzione globale  $f$  non viene mai definita esplicitamente, ma solo indirettamente attraverso la specificazione di una *regola locale*  $F$ . Infatti negli AC lo stato di ogni cella  $x_i$  dipende dal suo stato passato e da quello delle sue celle 'vicine'. Nel caso in cui  $x_i$  dipenda solo dallo stato immediatamente precedente del suo intorno, possiamo allora scrivere:

$$x_i^{t+1} = F[x_t^{i-r}, \dots, x_t^{i-1}, x_t^i, x_t^{i+1}, \dots, x_t^{i+r}] \quad \forall i \in Z, \forall t$$

dove  $r$  è l'ampiezza, o raggio, dell'intorno e  $F : S^{2r+1} \rightarrow S$ . A sua volta, la regola locale  $F$  indirettamente identifica la mappa globale  $f : X \rightarrow X$  definita in (1), la cui componente  $i$ -esima è quindi data da:

$$[f(y_{t+1})]^i = F[x_t^{i-r}, \dots, x_t^{i-1}, x_t^i, x_t^{i+1}, \dots, x_t^{i+r}].$$

[Figura 15 approssimativamente qui]

Fig. 15. *Intorni ad 8 e 5 celle su un reticolo regolare bidimensionale quadrato*

La regola locale considerata nel nostro modello è la cosiddetta regola *Vote* (cfr. Rucker (1989), pp. 193-199). Si tratta di una regola *totalitaria*, nella

quale cioè lo stato di ogni nodo dipende esclusivamente dal numero delle celle del suo intorno che, nel periodo precedente, si trovano in un certo stato  $s \in S$ . Supponendo  $S = \{0, 1\}$ , un esempio di questo tipo di regola è la seguente: lo stato della  $i$ -esima cella al tempo  $t + 1$  deve essere 1 se il numero di celle del suo intorno che, al tempo  $t$ , si trovano nello stato 1 è minore di  $k$  (norma di tipo anti-conformista). Il numero di possibili regole locali di tipo *Vote*, considerando intorni di 9 celle, è pari a  $2^{10} = 1024$ , mentre con intorni di 5 celle è  $2^6 = 64$ .

Gli AC sono pertanto sistemi dinamici discreti:

1. in senso spaziale, in quanto risultano costituiti da un reticolo (che nel nostro modello è bidimensionale regolare quadrato, come in Fig. 16) di unità elementari;
2. in senso temporale; l'evoluzione dello stato di ogni cella, e quindi dell'automa, avviene per passi temporali discreti;
3. nello stato di ogni cella, nel senso che ogni unità elementare può assumere soltanto un numero finito di stati (nel nostro caso, due soli stati: 0 e 1, coopera o non coopera).

La regola che governa l'evoluzione di ogni AC è inoltre sostanzialmente locale:

1. in senso spaziale, essa infatti tiene conto esclusivamente dello stato di un intorno prefissato di celle (nel nostro modello, un intorno di 9 celle, come in Fig.15. Non sono cioè ammesse 'azioni a distanza' fra le unità dell'automa;
2. in senso temporale; il nuovo valore di ogni cella dipende dal valore passato delle celle del suo intorno limitatamente ad un numero finito di periodi (nel nostro caso, un solo periodo).

Una ulteriore importante proprietà di questi automi è la loro sostanziale omogeneità:

1. l'insieme degli stati che ogni nodo può assumere è uguale per tutte le celle costituenti l'automa;

2. la legge evolutiva locale è la stessa per ogni cella, indipendentemente dalla posizione spazio-temporale in cui essa si trova (ciò equivale nel nostro modello ad ipotizzare popolazioni motivazionalmente omogenee); come si è già detto, ci limitiamo qui a considerare i cosiddetti AC *isotropi*, caratterizzati da regole locali spazialmente e temporalmente costanti e deterministiche. Gli AC anisotropi e probabilistici rappresentano un campo ancora poco esplorato, ma certamente assai interessante, in special modo per il tipo di fenomeni da noi qui analizzati;
3. l'intorno di ogni cella è topologicamente uguale a quello di tutti gli altri intorni (vedi gli esempi di Fig. 15), ed ogni cella 'vede' di periodo in periodo intorno a se' sempre le medesime celle, che ovviamente sono diverse dalle celle di qualunque altro intorno (questo equivale nel modello proposto ad ipotizzare una topologia relazionale con opportunità di incontro date e costanti);

Da ultimo va ricordato che negli AC l'evoluzione dello stato delle celle avviene in modo sincrono (esse vengono cioè 'aggiornate' tutte contemporaneamente) e si presta quindi ad essere simulata mediante macchine dotate di un elevato grado di parallelismo, con interconnessioni locali ed uniformi, quali la CAM-6 di Toffoli e Margolus (cfr. Toffoli e Margolus (1987)).

Riassumendo, l'AC considerato nel nostro modello di interazione fra individui è quindi un AC binario isotropo in cui i nodi, cioè i singoli agenti, sono disposti su di un reticolo bidimensionale regolare quadrato, con condizioni periodiche al contorno (vedi Fig. 16). L'intorno di ciascuna cella è formato dalle 8 celle circostanti più la cella stessa. La regola evolutiva locale è una regola totalitaria di tipo *Vote*.

[Figura 16 approssimativamente qui]

Fig. 16. *Reticolo regolare bidimensionale quadrato con condizioni al contorno di tipo toroidale*

Nella teoria matematica degli automi cellulari una questione di primaria importanza è l'analisi e la classificazione dei possibili comportamenti dina-

mici del sistema. Si tratta di un problema di assai difficile soluzione e tuttora aperto in quanto negli AC, a differenza dei sistemi dinamici classici, l'evoluzione delle dinamiche deve essere studiata nella sua duplice dimensione spazio-temporale. Gli approcci solitamente seguiti per affrontare la delicata questione sono sostanzialmente di due tipi, a seconda del tipo di descrizione che sono in grado di fornire: qualitativo e quantitativo. Al primo gruppo appartiene l'*approccio sperimentale*, basato su simulazioni dirette degli AC mediante l'uso di calcolatori. Gli studi sinora condotti con questo metodo hanno posto in evidenza l'esistenza di quattro classi fondamentali di AC <sup>4</sup> corrispondenti ad altrettanti comportamenti dinamici di lungo periodo:

1. **Classe 1:** evoluzioni verso stati stazionari del tutto simili ai punti fissi nello spazio di fase di un sistema dinamico classico; l'AC evolve cioè, a partire da una qualsiasi configurazione iniziale delle celle (a meno di un insieme di misura nulla), verso un'unica configurazione globale nella quale tutte le celle mantengono immutato il loro stato nel tempo;
2. **Classe 2:** evoluzioni verso configurazioni spazio-temporali periodiche, analoghe ai cicli limite, in cui lo stato di alcune o tutte le celle muta nel tempo seguendo una qualche sequenza ciclica, tipicamente di periodo finito e breve;
3. **Classe 3:** evoluzioni che, a partire da (quasi) qualsiasi configurazione iniziale, convergono verso configurazioni aperiodiche e caotiche, sotto molti aspetti simili a quelle riscontrate negli attrattori caotici dei sistemi dinamici, in cui piccole perturbazioni delle condizioni iniziali si espandono nel tempo e nello spazio ad un tasso asintoticamente costante, dando luogo a configurazioni globali 'disordinate' e turbolente;
4. **Classe 4:** le dinamiche appartenenti a questa quarta classe dipendono in stretta misura dalla scelta della condizione iniziale; per certe configurazioni di partenza l'automa può infatti convergere verso stati stazionari o periodici, oppure può presentare delle evoluzioni aperiodiche caratterizzate da strutture (*gliders*) che si propagano spazialmente all'interno del reticolo; la caratteristica più importante di questa classe è quella di godere della proprietà di *computabilità universale*: questi AC sono cioè

---

<sup>4</sup>Esistono però anche esempi di casi intermedi che sfuggono a questa e, più in generale, a tutte le classificazioni proposte, come evidenziato in Wolfram (1985).

sistemi teoricamente capaci di simulare, per condizioni iniziali opportunamente specificate, qualsiasi altro sistema o procedura algoritmica e sono quindi capaci di comportamenti arbitrariamente complicati (cfr. Wolfram (1984c));

Concretamente, l'approccio sperimentale parte con il considerare un numero (possibilmente molto elevato) di configurazioni iniziali (scelte casualmente e/o secondo regole fissate), nel simulare su di un calcolatore l'evoluzione spazio-temporale dell'AC (considerando un numero  $N$  di celle possibilmente molto grande) e nel rilevare e classificare (dopo un periodo transitorio sufficientemente lungo) le caratteristiche qualitative delle dinamiche di equilibrio (strutture stazionarie, periodiche, aperiodiche, caotiche, gliders, etc.). Nelle figure 2-6 e 8-14 vengono riportati, per i diversi AC da noi qui considerati, alcuni esempi di queste evoluzioni spazio-temporali (per  $t = 5, 25$  e  $30$ ) a partire da configurazioni iniziali ( $t = 1$ ) casuali e non. Dalle numerose sperimentazioni condotte, possiamo ragionevolmente concludere che alla Classe 1 appartengono gli AC di figura 2, 3a e b, 4, 5a e b, 8, alla Classe 2 gli AC di figura 6a e b, 9a e b, alla Classe 3 gli AC di figura 12, 13 e 14, ed alla Classe 4 quelli di figura 10, 11a, b e c.

Fra i metodi di descrizione di tipo quantitativo delle dinamiche di equilibrio (che noi non abbiamo però qui considerato) vanno invece ricordati:

1. l'approccio statistico, incentrato sullo studio dell'evoluzione delle densità di celle o blocchi di celle con un prefissato valore, sulle funzioni di correlazione e sulla decomposizione di Fourier (cfr. Wolfram (1983));
2. l'approccio basato sulla teoria dei sistemi dinamici, che fa ricorso alle nozioni di entropia spaziale, temporale e topologica, e agli esponenti di Lyapunov (cfr. Wolfram (1983), Shereshevsky (1992));
3. l'approccio basato sulla teoria dei linguaggi formali e della computazione (cfr. Wolfram (1984b)); da un lato esso mostra che l'insieme delle configurazioni generate dall'evoluzione di taluni AC costituisce un linguaggio regolare, e dall'altra consente di investigare sulle delicate questioni dell'indcidibilità del comportamento asintotico degli AC (per quelli di classe 3 e 4), e sulla già citata proprietà della computabilità universale;
4. l'approccio algebrico (cfr. Wolfram (1984a)).

## Bibliografia

- [Bak et al. (1988)] P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld (1988), '*Self-organized criticality*', Physical Review A, 38.
- [Bak et al. (1989)] P. Bak, K. Chen, M. Creutz (1989), '*Self-organized criticality in the 'game of life'*', Nature, 342.
- [Berger e Luckmann (1966)] P. Berger, T. Luckmann (1966), The social construction of reality, Doubleday, New York (tr. it. Il Mulino, Bologna).
- [Elster (1989)] J. Elster (1989), The cement of society. A study of social order, Cambridge University Press, Cambridge (tr. it. Il Mulino, Bologna).
- [Gaylord e Wellin (1995)] R.J. Gaylord e P.R. Wellin (1995), Computer Simulations with Mathematica. Explorations in Complex Physical and Biological Systems, Telos, Springer Verlag, New York.
- [Granovetter (1973)] M. Granovetter (1973), '*The strength of weak ties*', American Journal of Sociology 78.
- [Granovetter (1978)] M. Granovetter (1978), '*Threshold models of collective behavior*', American Journal of Sociology 83.
- [Granovetter (1985)] M. Granovetter (1985), '*Economic action and social structure: The problem of embeddedness*', American Journal of Sociology 91.
- [Huberman e Hogg (1988)] B. Huberman, T. Hogg (1988), '*The Behavior of Computational Ecologies*', in B. Huberman (ed.) The Ecology of Computation, North Holland, Amsterdam.
- [Marwell, Oliver e Prahl (1988)] G. Marwell, P. Oliver, R. Prahl (1988), '*Social networks and collective action: A theory of the critical mass, III*', American Journal of Sociology 94.
- [Oliver et al. (1988)] P.E. Oliver, G. Marwell (1988), '*The paradox of group size in collective action: A theory of the critical mass, II*', American Sociological Review 53.

- [Oliver et al. (1985)] P.E. Oliver, G. Marwell, R. Teixeira (1985), ‘*A theory of the critical mass, I. Interdependence, group heterogeneity, and the production of collective action*’, *American Journal of Sociology* 91.
- [Olson (1965)] M. Olson (1965), *The logic of collective action*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (tr. it. Feltrinelli, Milano).
- [Raub e Weesie (1990)] W. Raub, J. Weesie (1990), ‘*Reputation and efficiency in social interactions: An example of network effects*’, *American Journal of Sociology* 96.
- [Rucker (1989)] R. Rucker, *CA Lab user guide*, Autodesk, Inc., Sansalito CA, 1989.
- [Sacco (1994)] P.L. Sacco (1994), ‘*Selection mechanisms in economics*’, *Behavioral Science* 39.
- [Schelling (1978)] T.C.Schelling (1978), *Micromotives and Macrobehavior*, Norton, New York.
- [Shereshevsky (1992)] M.A. Shereshevsky, *Lyapunov exponents for one-dimensional cellular automata*, *Journal of Nonlinear Science*, **2**, pp. 1-8, 1992.
- [Toffoli e Margolus (1987)] T. Toffoli e N. Margolus (1978), *Cellular Automata Machine*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- [Wolfram (1983)] S. Wolfram, *Statistical mechanics of cellular automata*, *Review of Modern Physics*, **35**, pp. 601-644, 1983. Ripubblicato in: S. Wolfram, *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 1986.
- [Wolfram (1984a)] S. Wolfram, *Algebraic properties of cellular automata*, *Commun. Math. Phys.* 93, pp. 219-258, 1984. Ripubblicato in: S. Wolfram, *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 1986.
- [Wolfram (1984b)] S. Wolfram, *Computation theory of cellular automata*, *Commun. Math. Phys.* 96, pp. 15-57, 1984. Ripubblicato in: S. Wolfram, *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 1986.

- [Wolfram (1984c)] S. Wolfram, *Universality and complexity in cellular automata*, Physica 10D, pp. 1-35, 1984. Ripubblicato in: S. Wolfram, *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 1986.
- [Wolfram (1985)] S. Wolfram, *Twenty problems in the theory of cellular automata*, Physica Scripta, Vol T9, pp. 170-183, 1985. Ripubblicato in: S. Wolfram, *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 1986.
- [Wolfram (1986)] S. Wolfram (1986), *Theory and applications of cellular automata*, World Scientific, Singapore.
- [Wuensche e Lesser (1992)] A. Wuensche, M. Lesser (1992), *The global dynamics of cellular automata. The atlas of basin of attraction fields of one-dimensional cellular automata*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Reference Volume I, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, Massachusetts.
- [Yamagishi et al. (1988)] T. Yamagishi, M.R. Gillmore, K.S. Cook (1988), *Network connections and the distribution of power in exchange networks*, American Journal of Sociology 93.

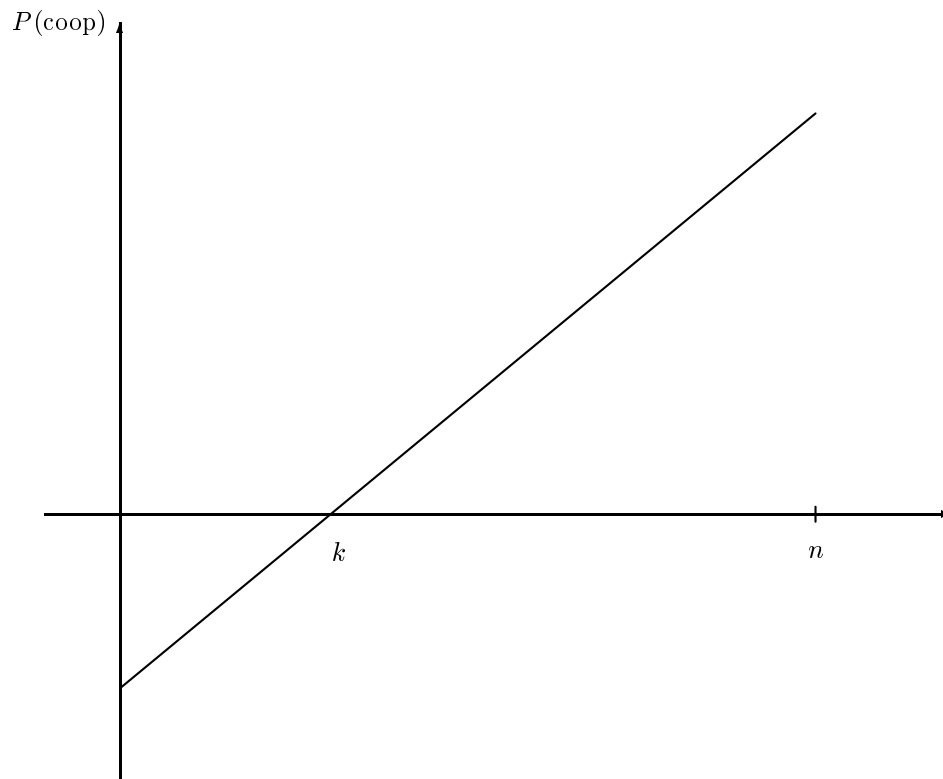


Figura 1: Determinazione della norma di imparzialità in termini della soglia di cooperazione autosufficiente.

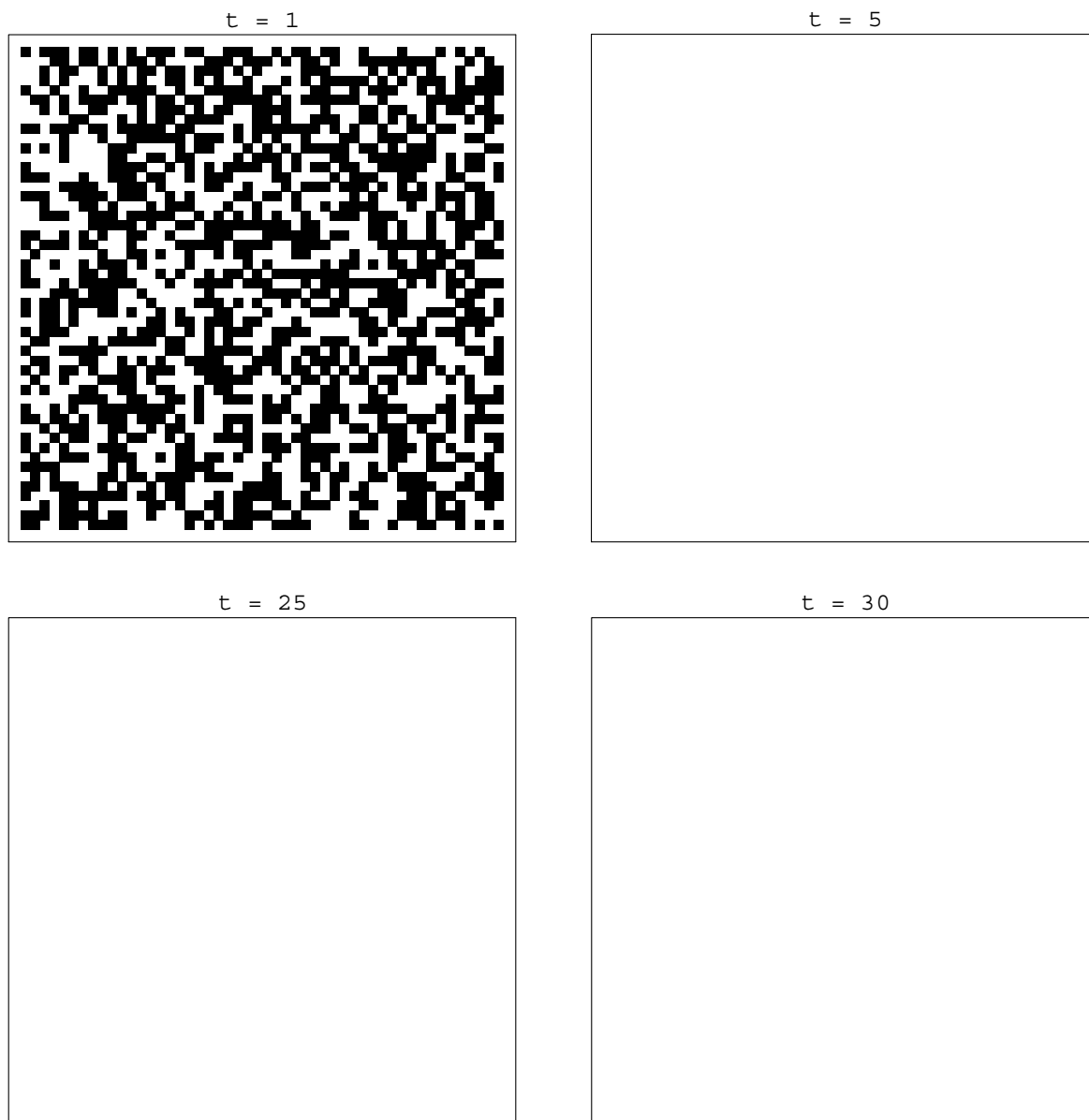


Figura 2:  $k=7$

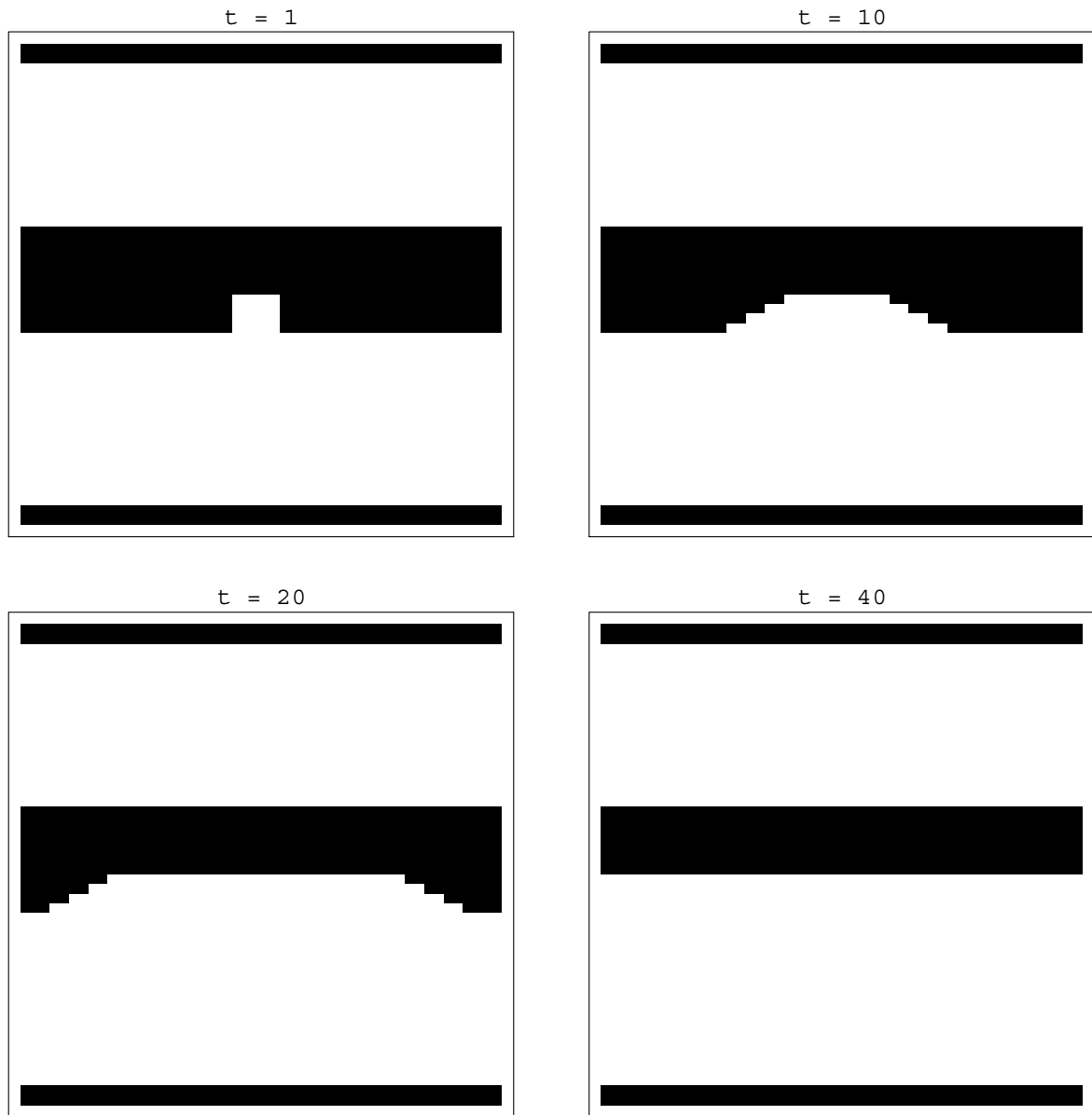


Figura 3: (a),  $k=6$

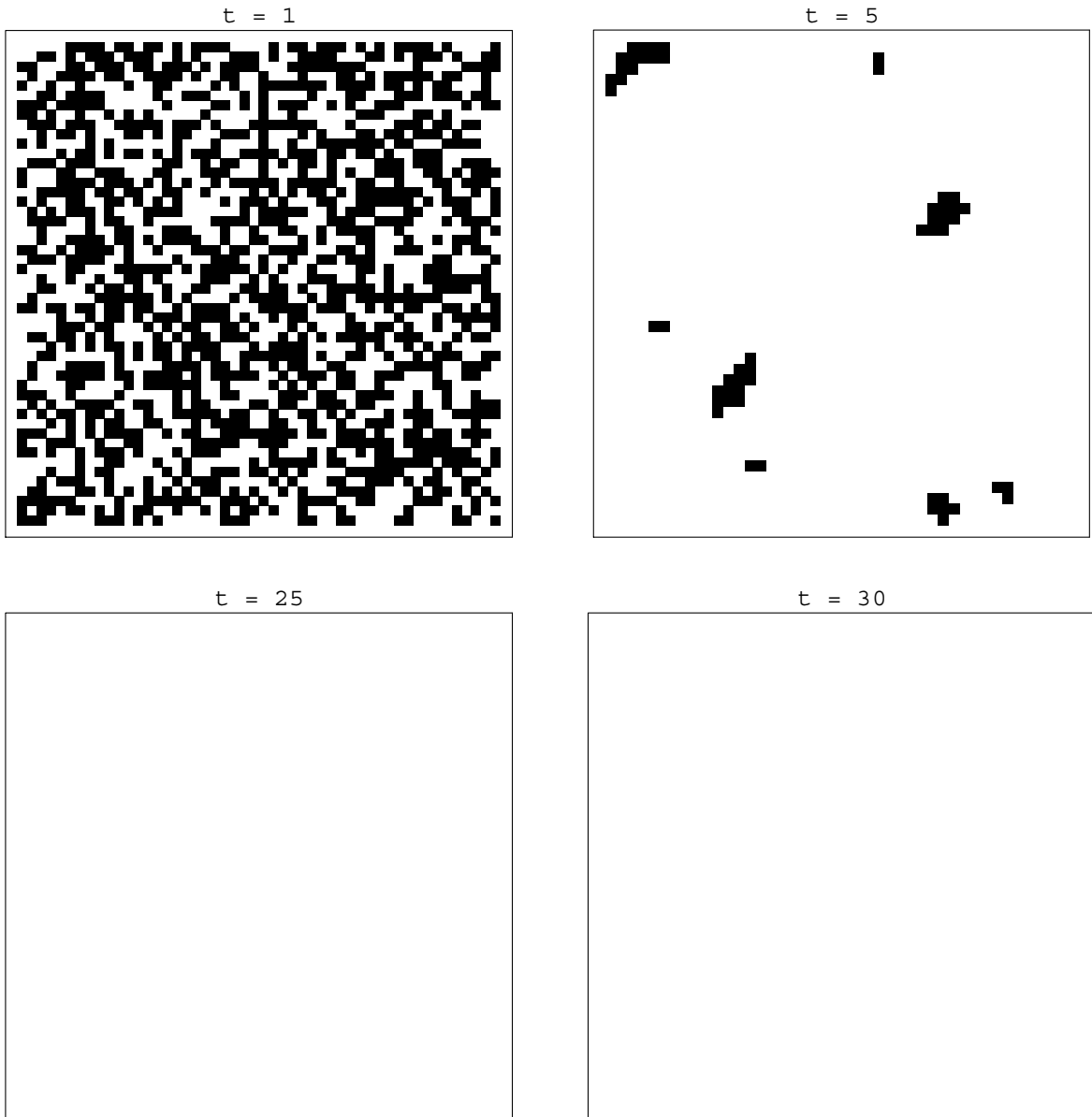


Figura 3:(b),  $k=6$

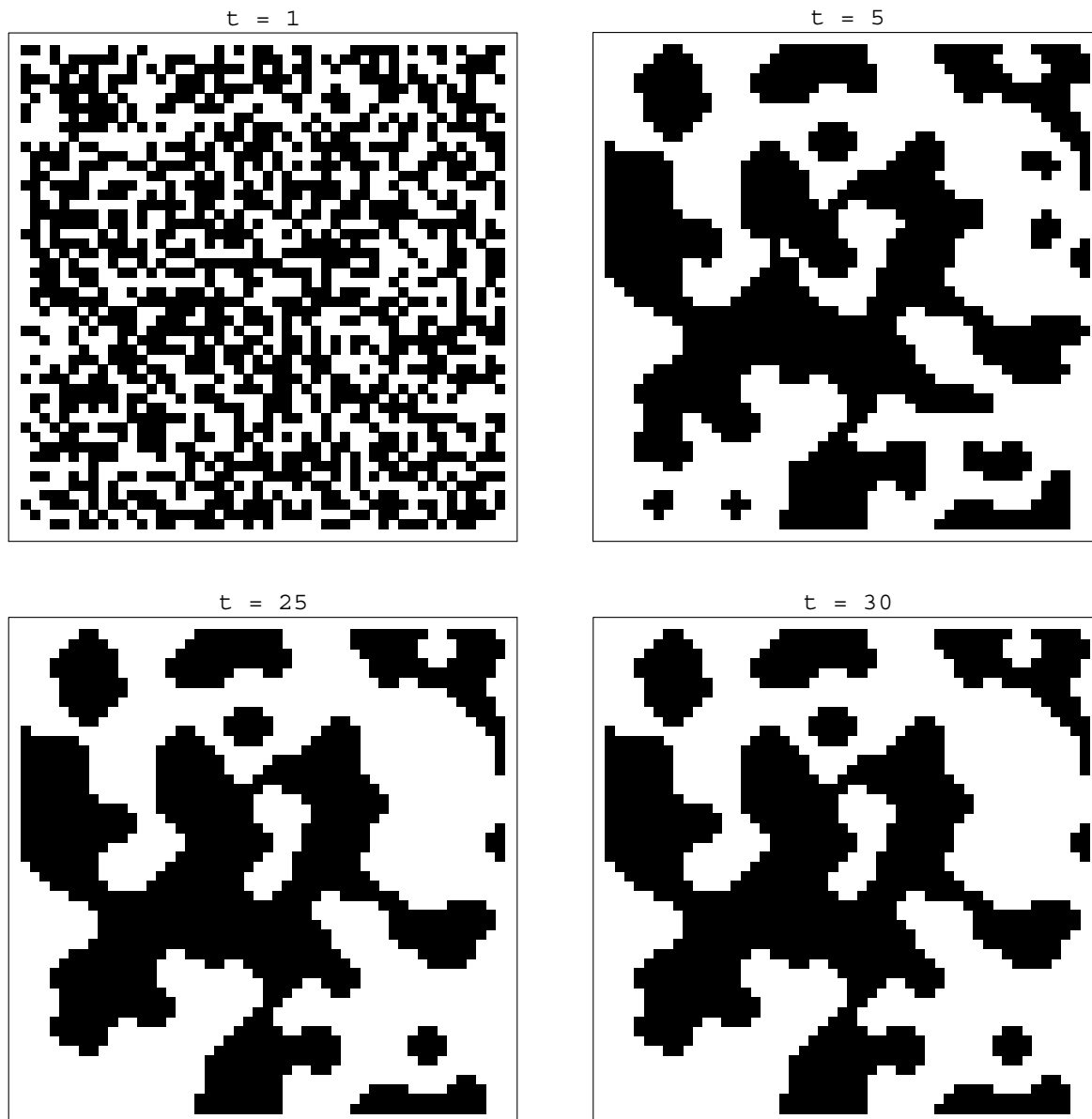


Figura 4:  $k=5$

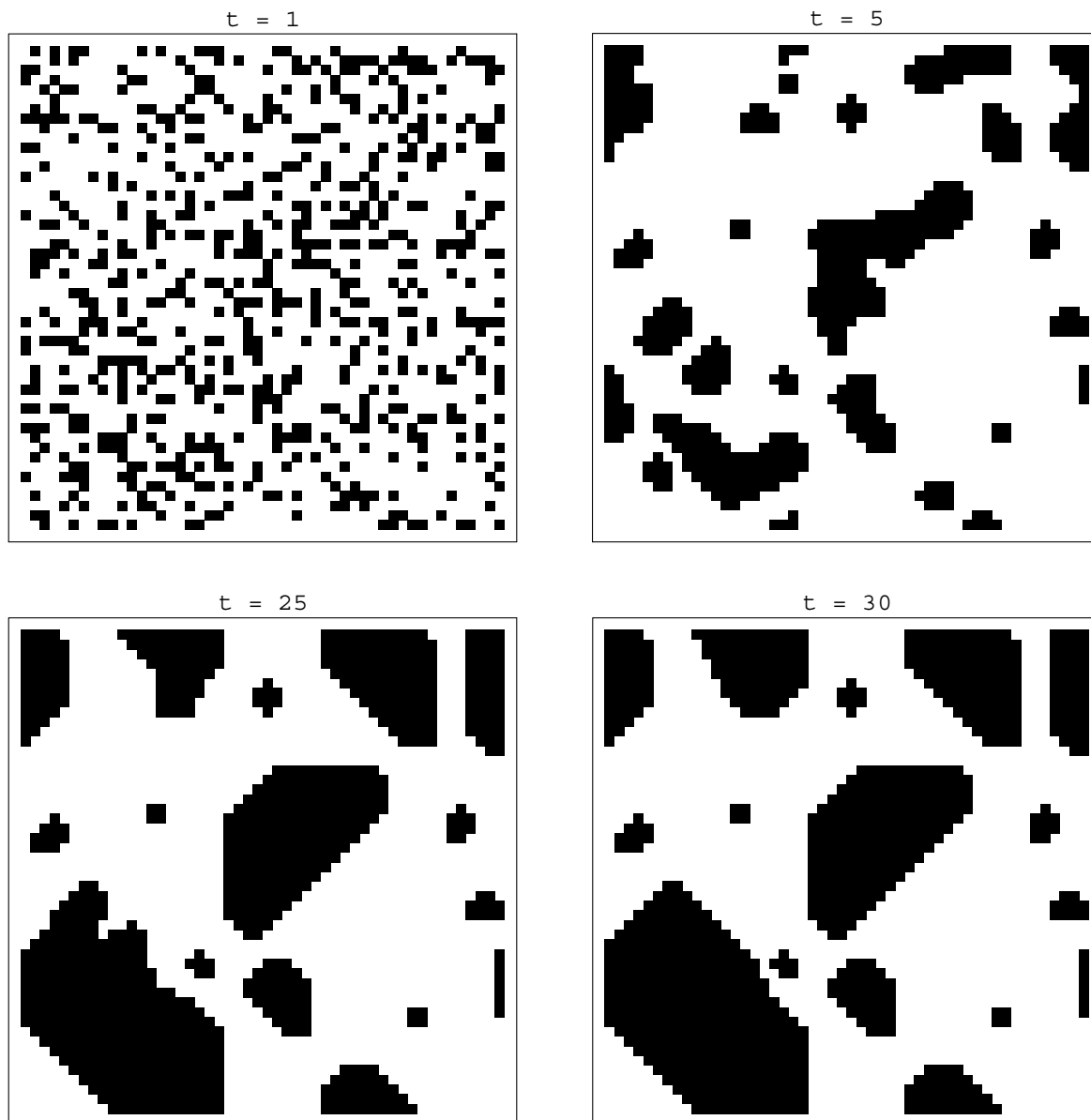


Figura 5: (a),  $k=4$

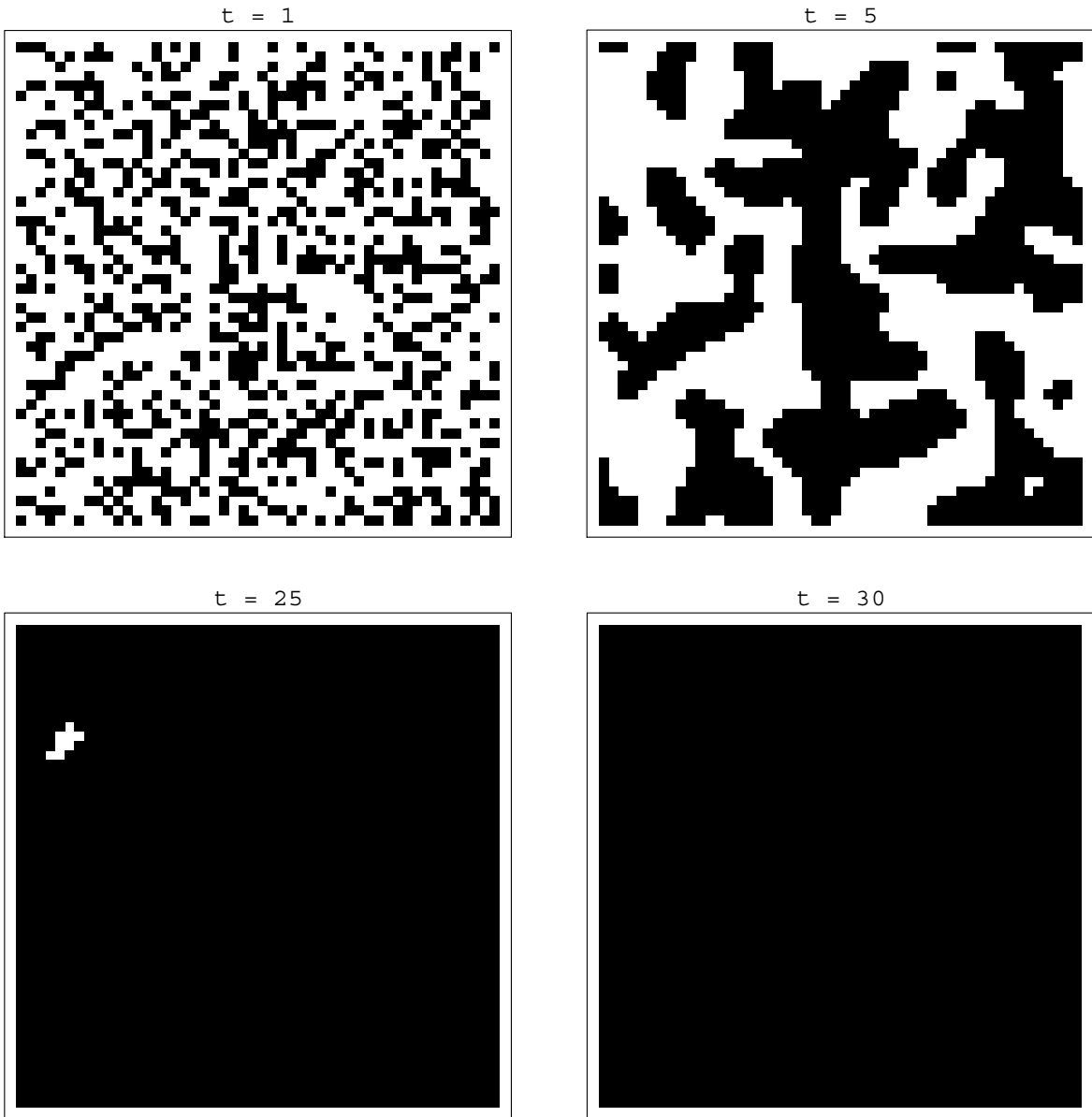


Figura 5: (b),  $k=4$

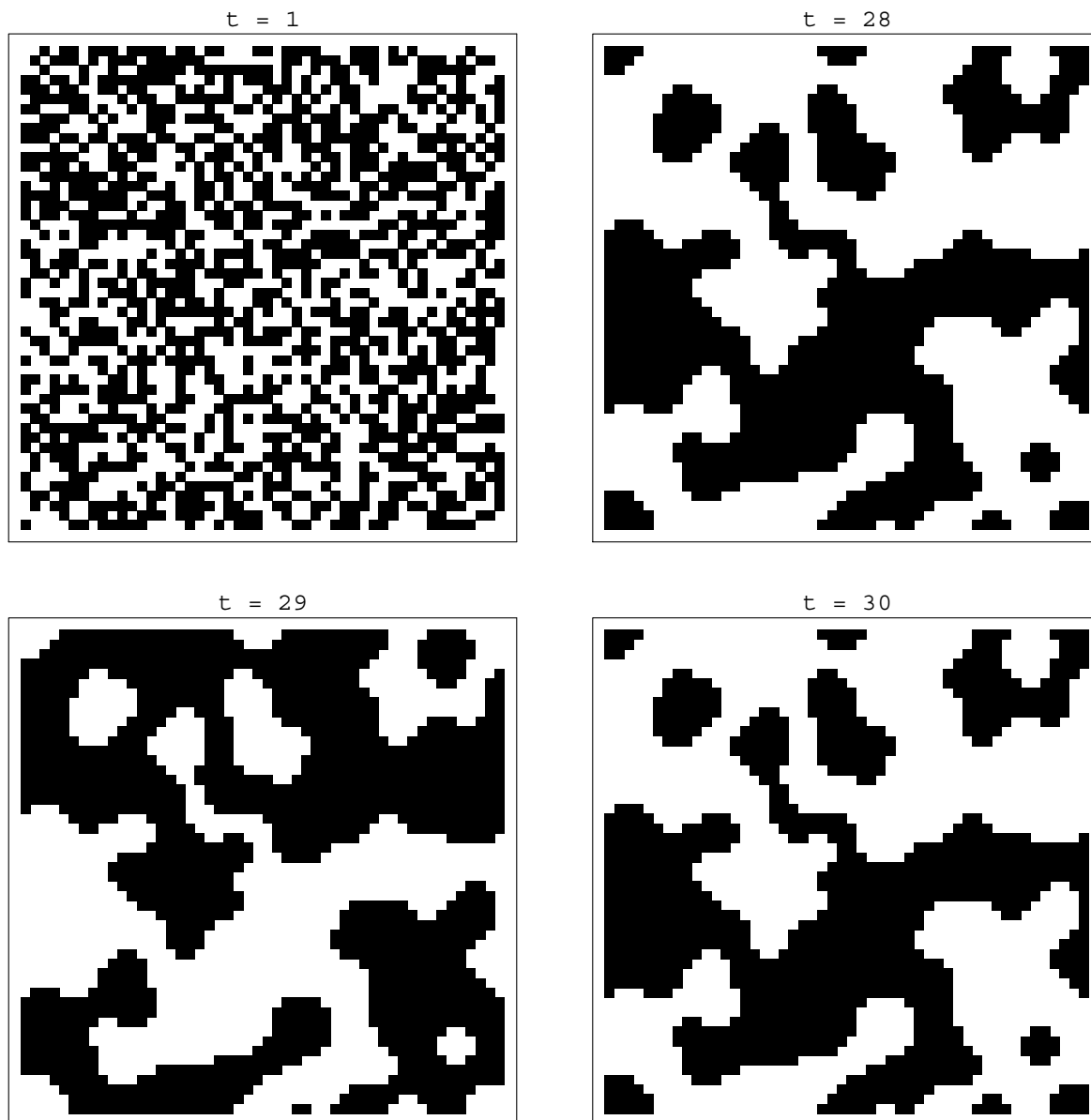


Figura 6: (a),  $h=4$

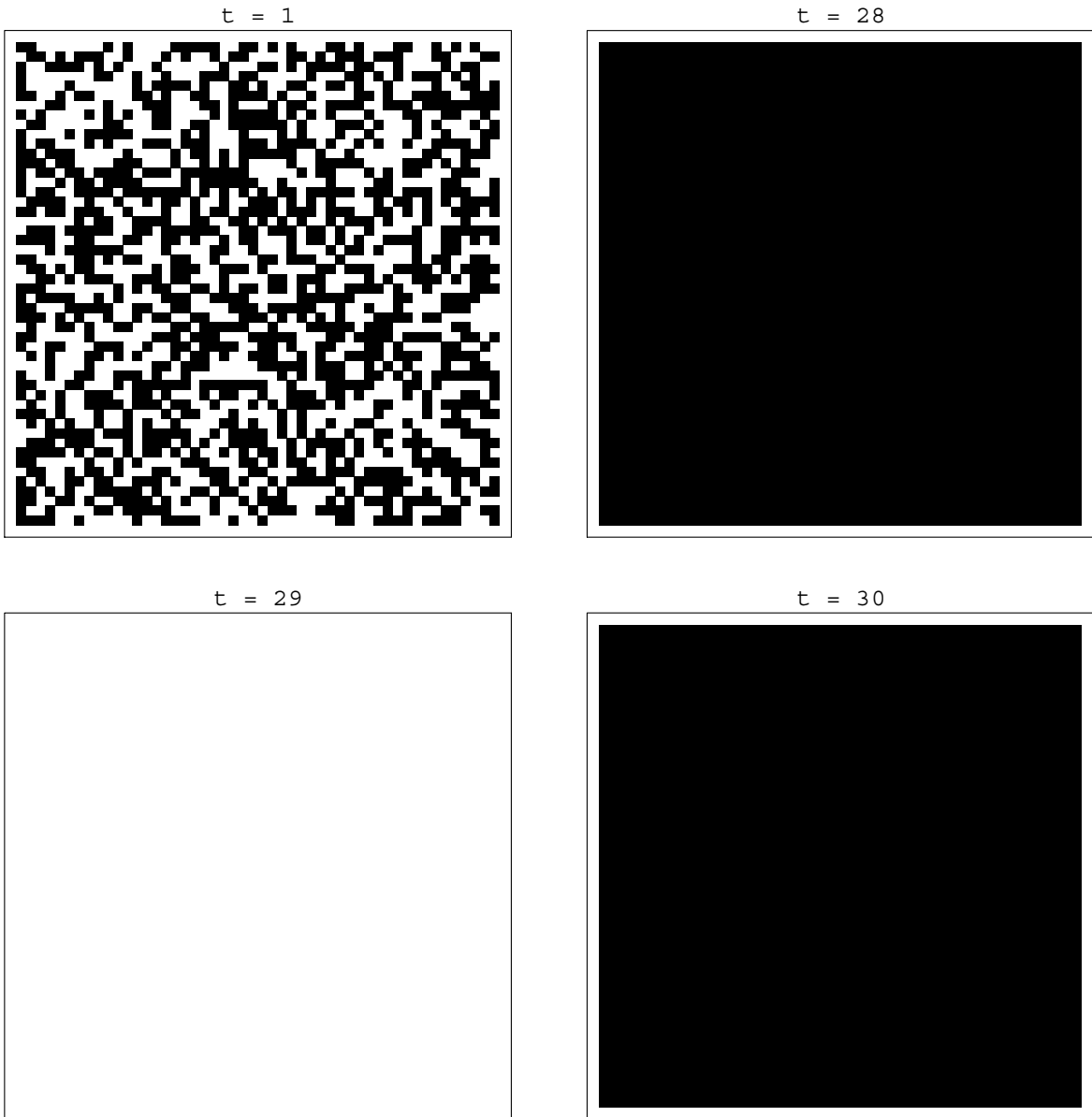


Figura 6: (b),  $h=5$

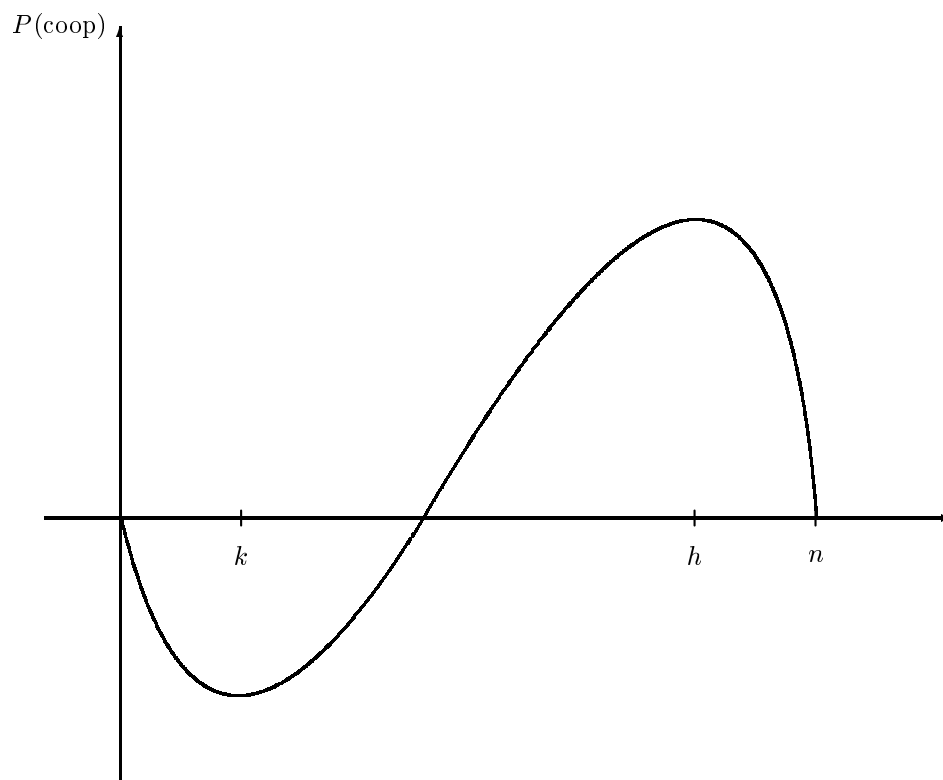


Figura 7: Funzione nonlineare di payoff con soglia minima e massima di cooperazione per soggetti utilitaristi.

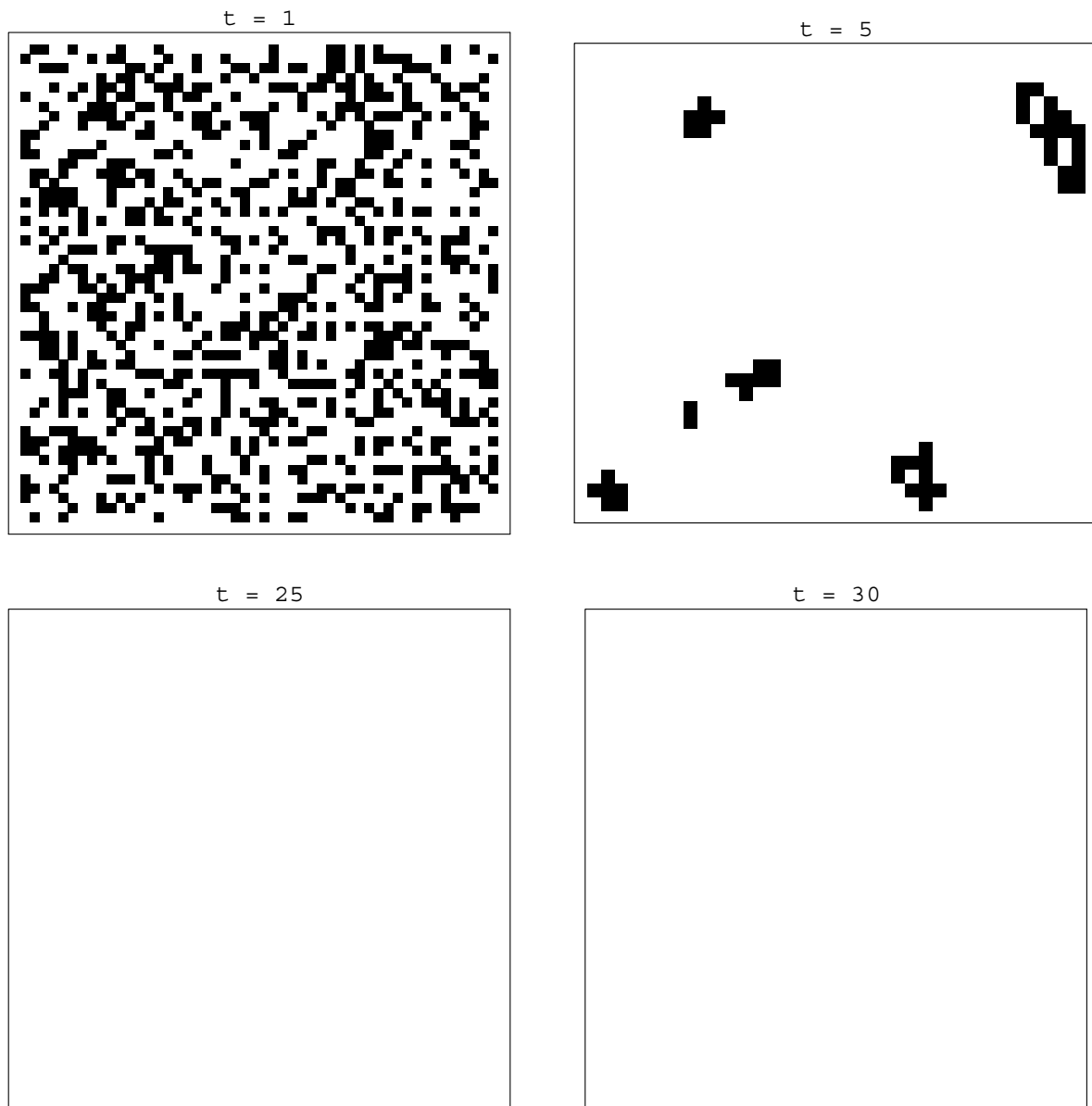


Figura 8:  $k=5$ ,  $h=7$

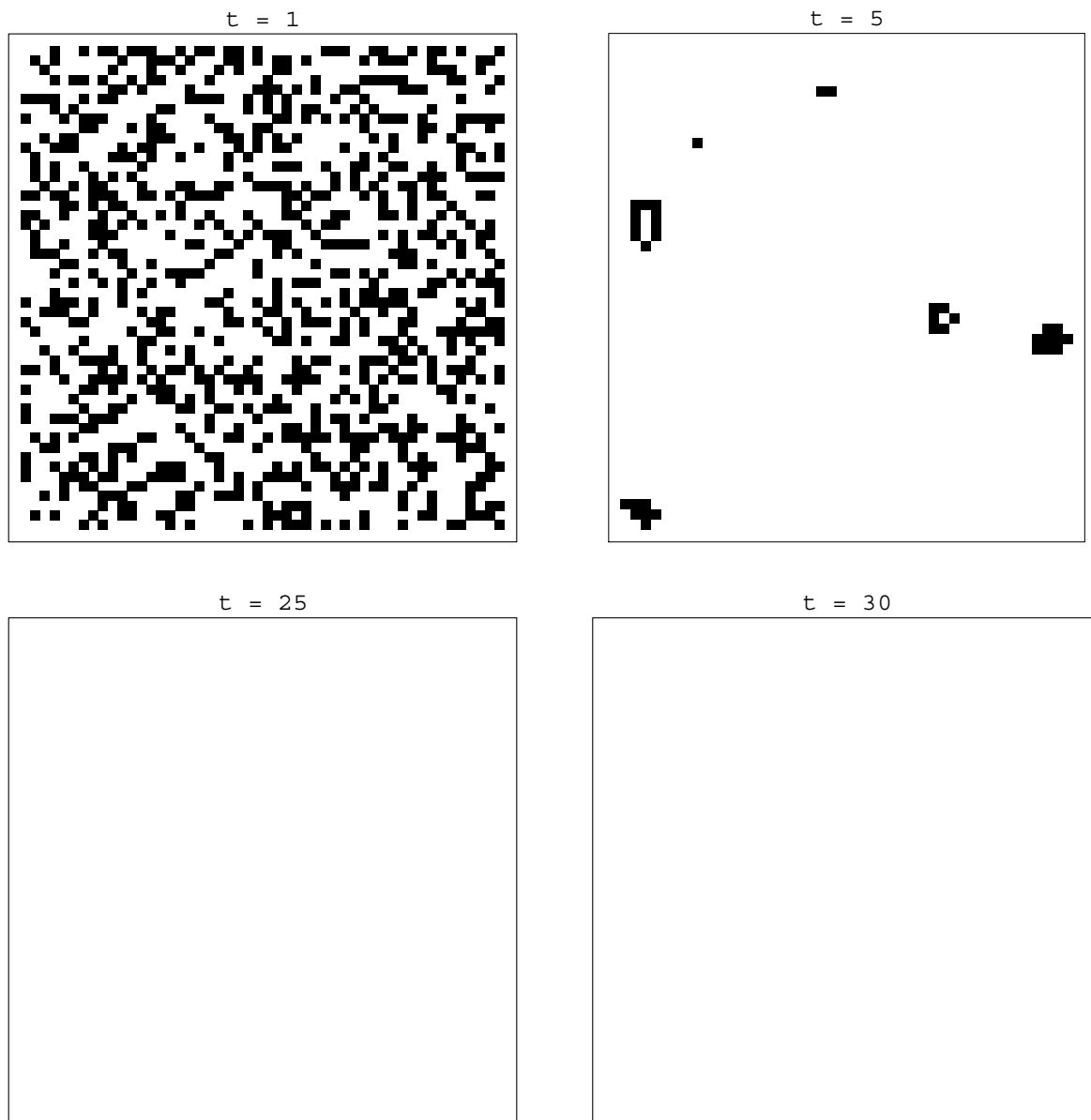


Figura 9: (a),  $k=5$ ,  $h=8$

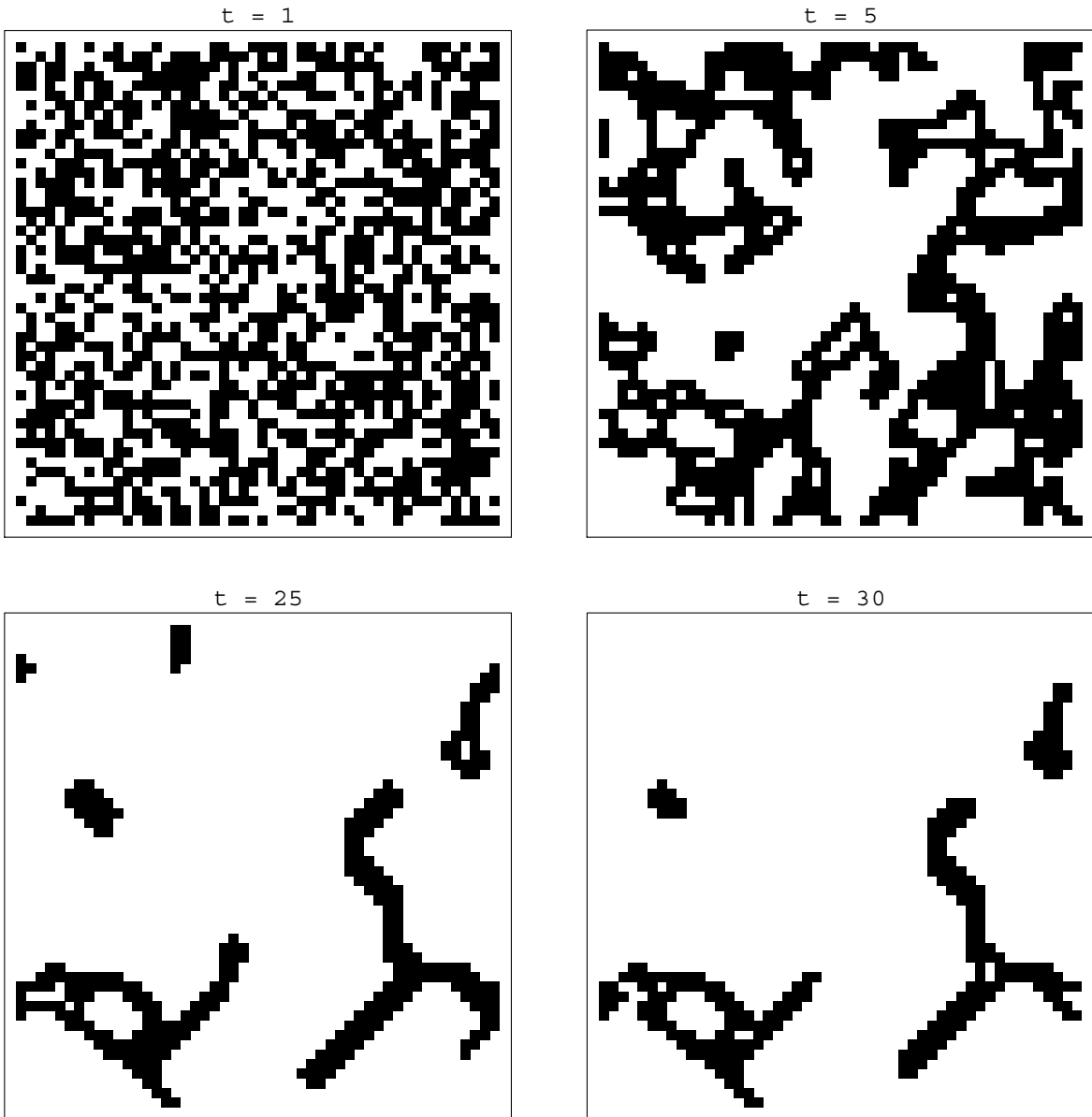


Figura 9: (b),  $k=5$ ,  $h=8$

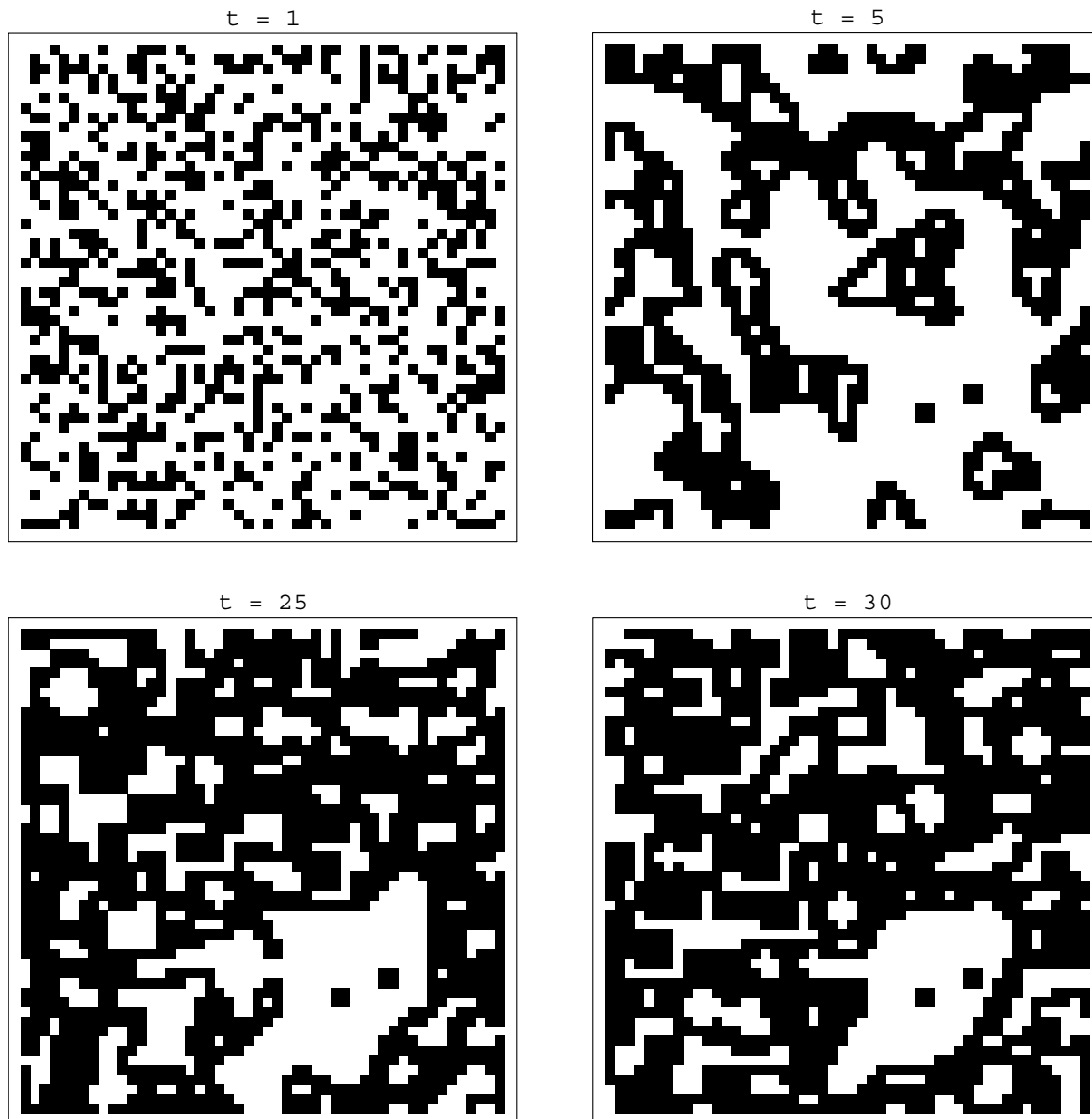


Figura 10:  $k=4$ ,  $h=8$

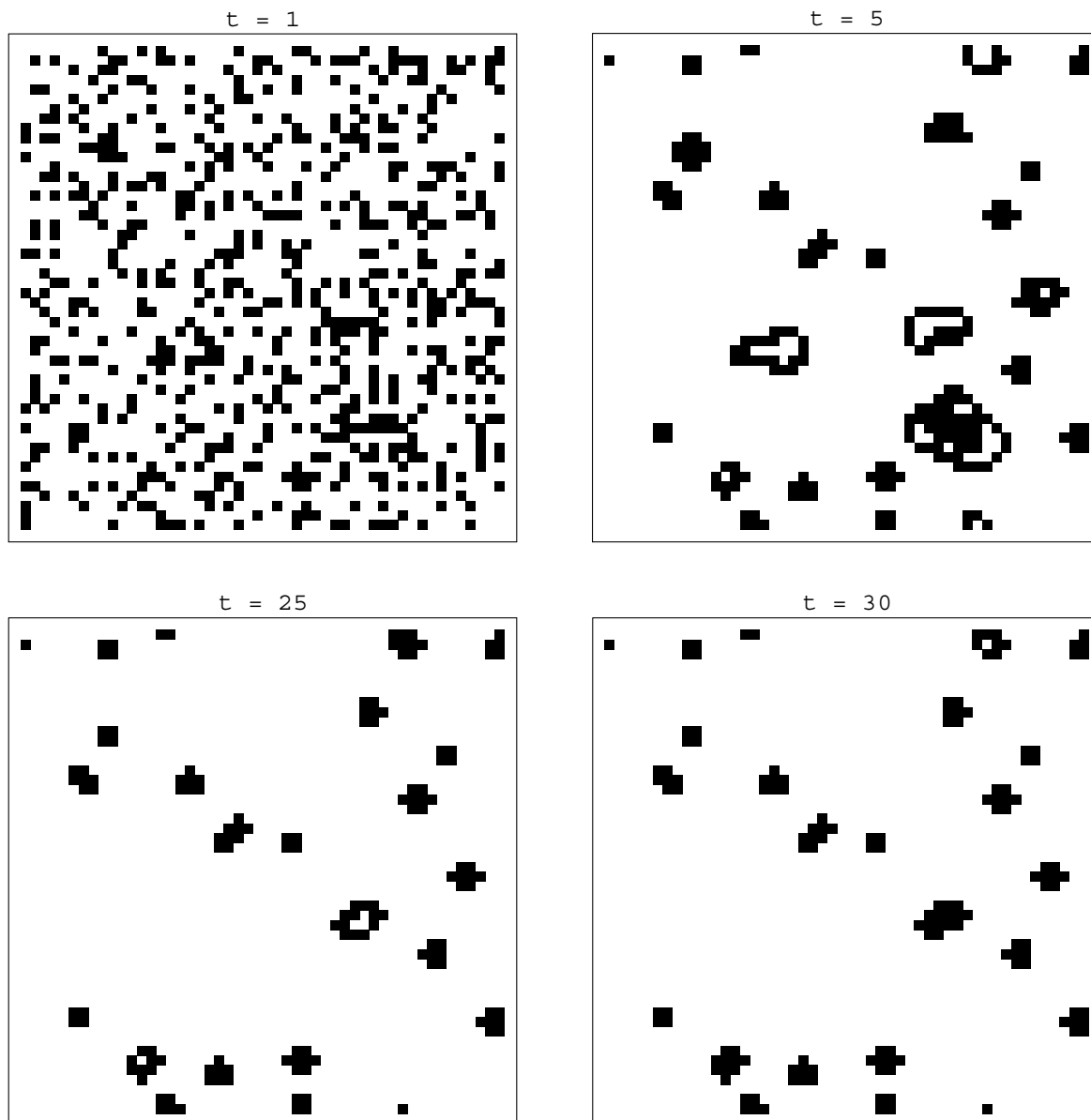


Figura 11: (a),  $k=4$ ,  $h=7$

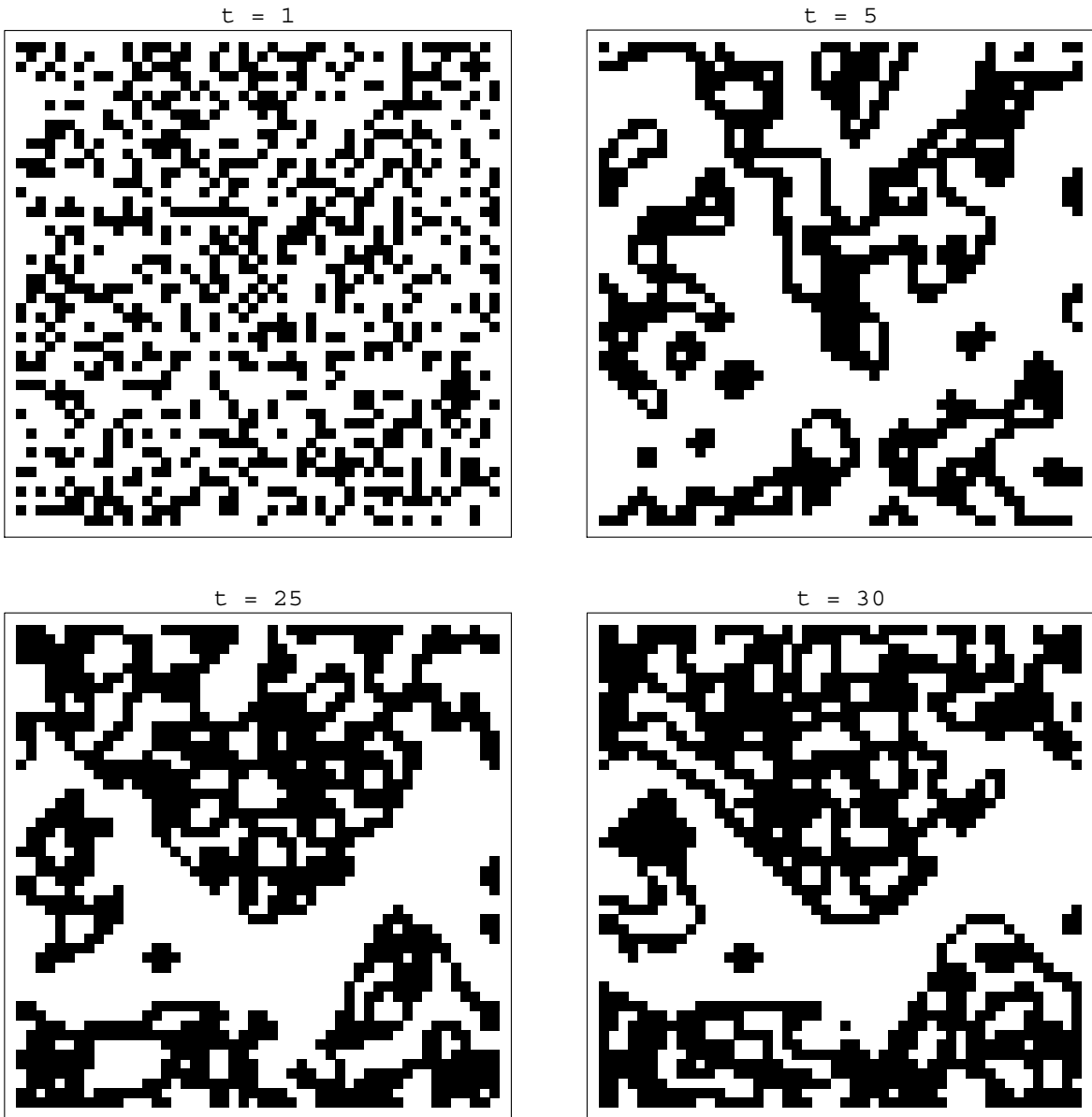


Figura 11: (b),  $k=4$ ,  $h=7$

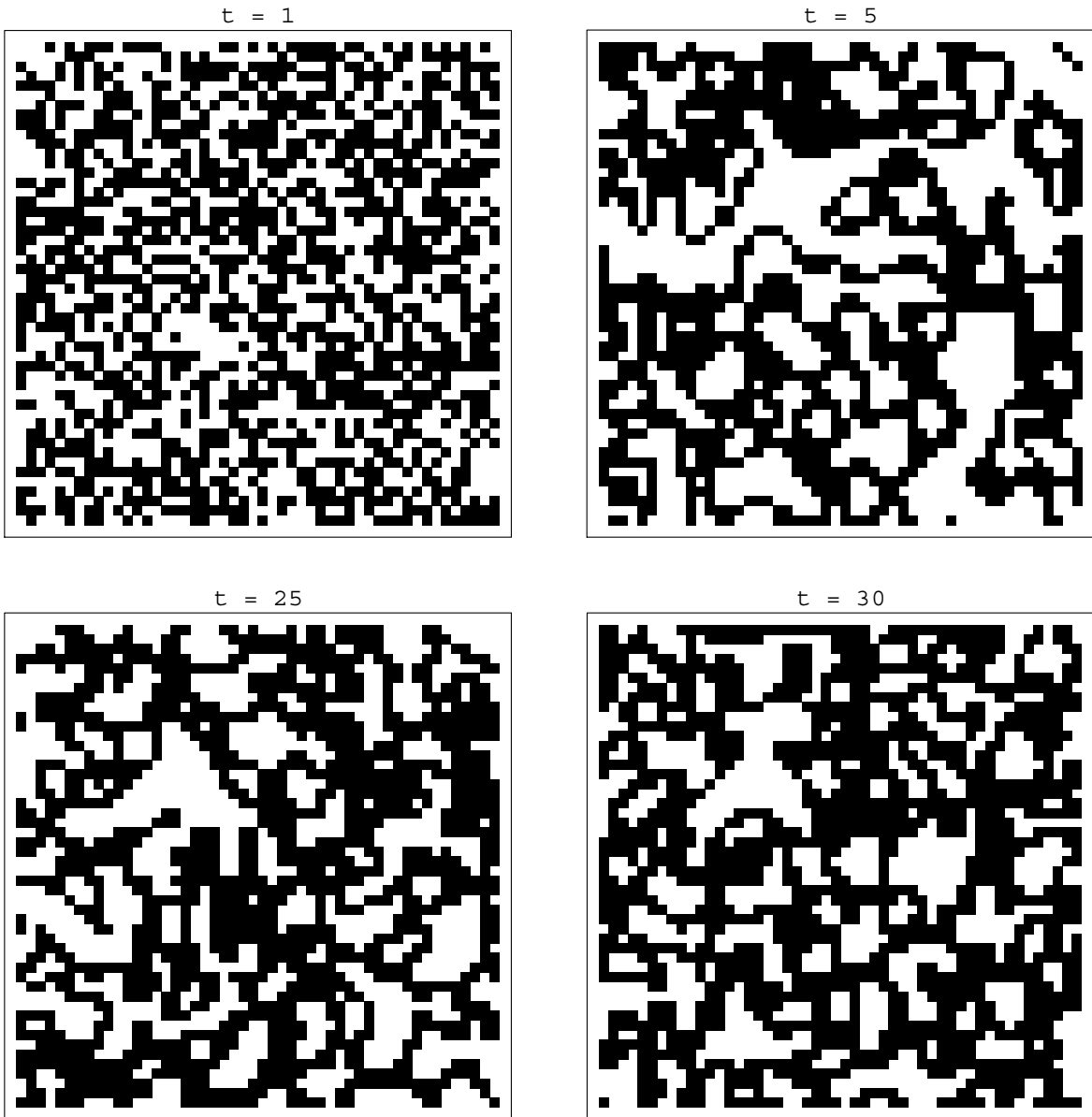


Figura 11: (c),  $k=4$ ,  $h=7$

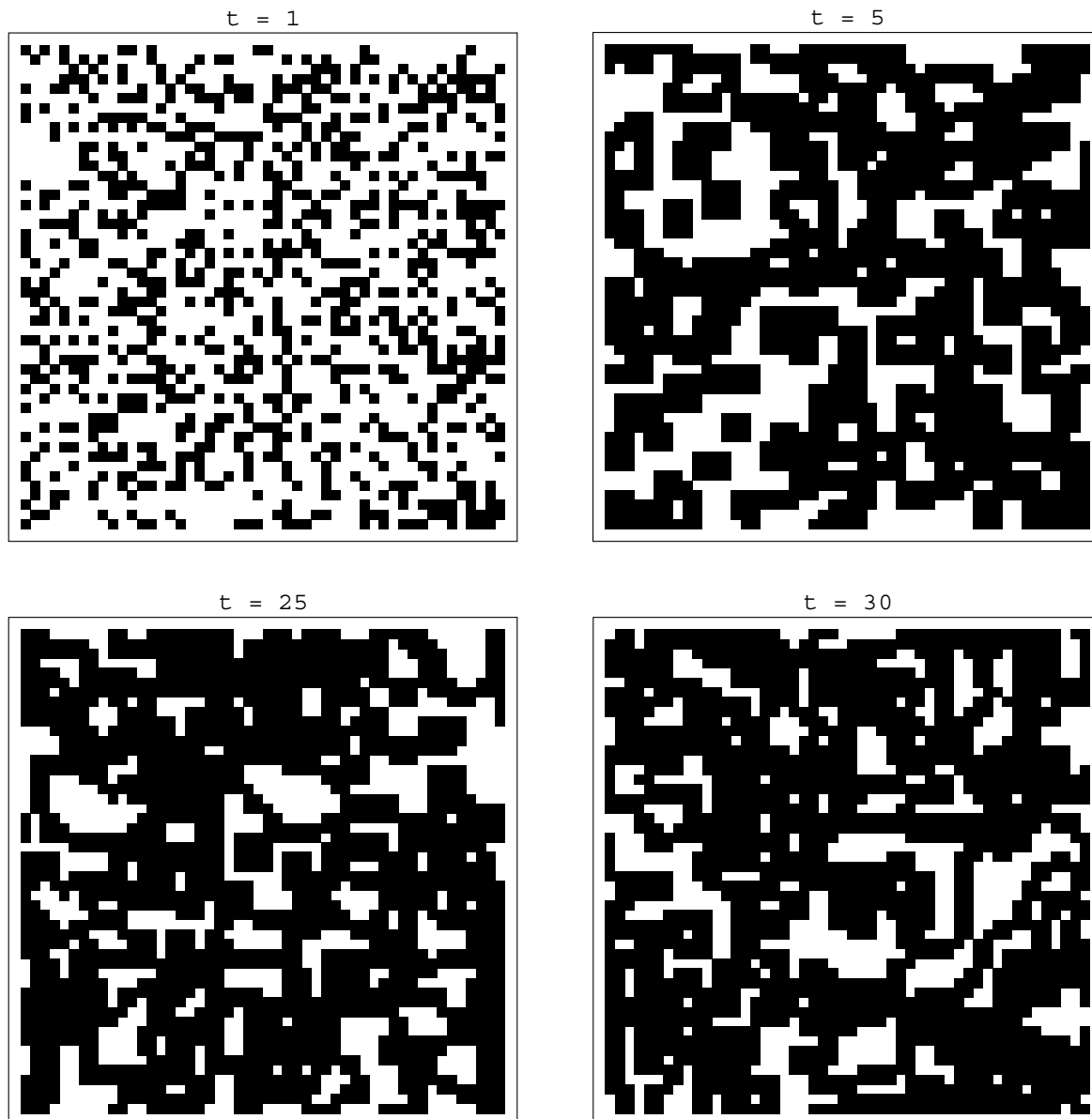


Figura 12:  $k=3$ ,  $h=8$

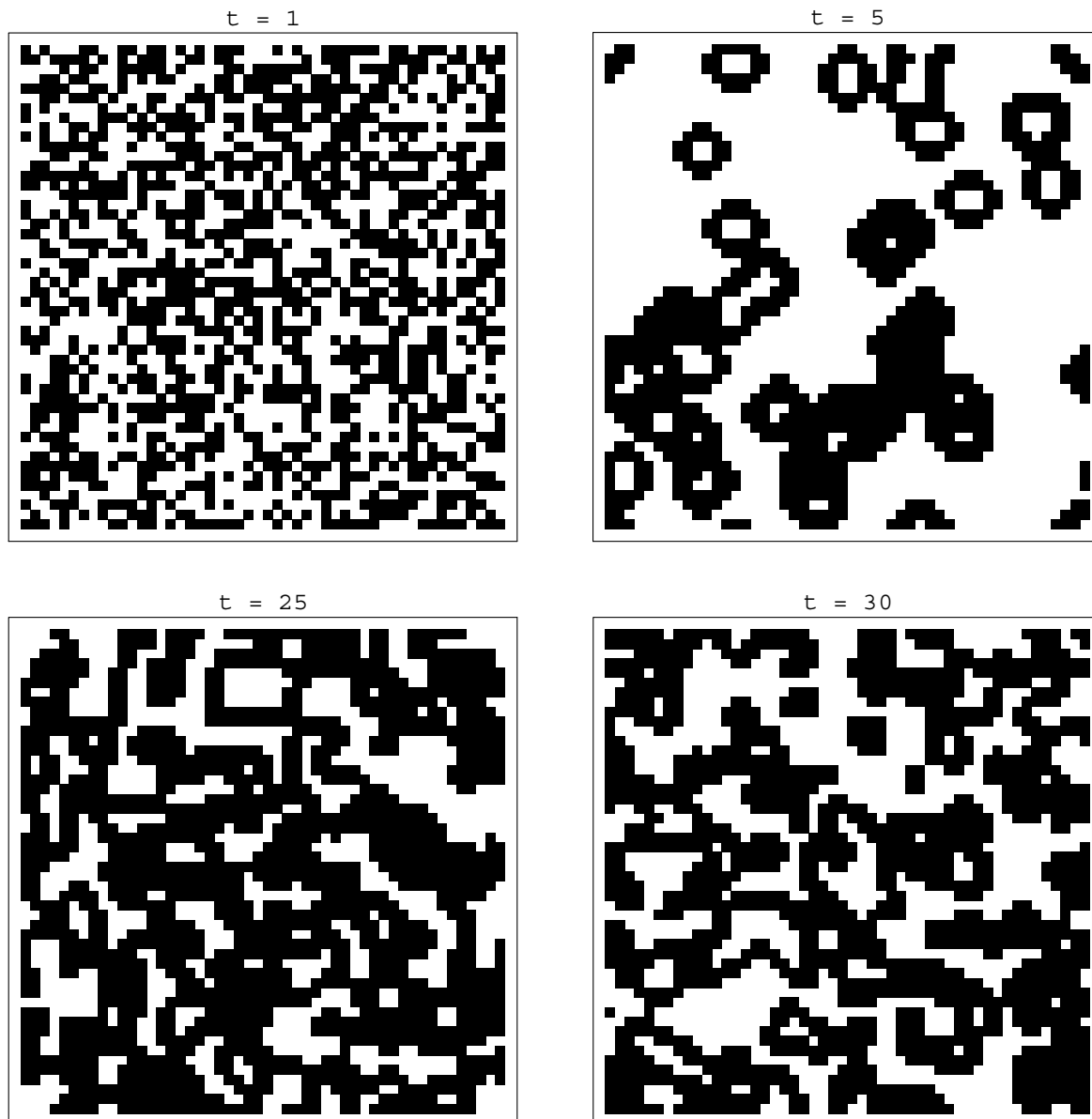


Figura 13:  $k=2$ ,  $h=7$

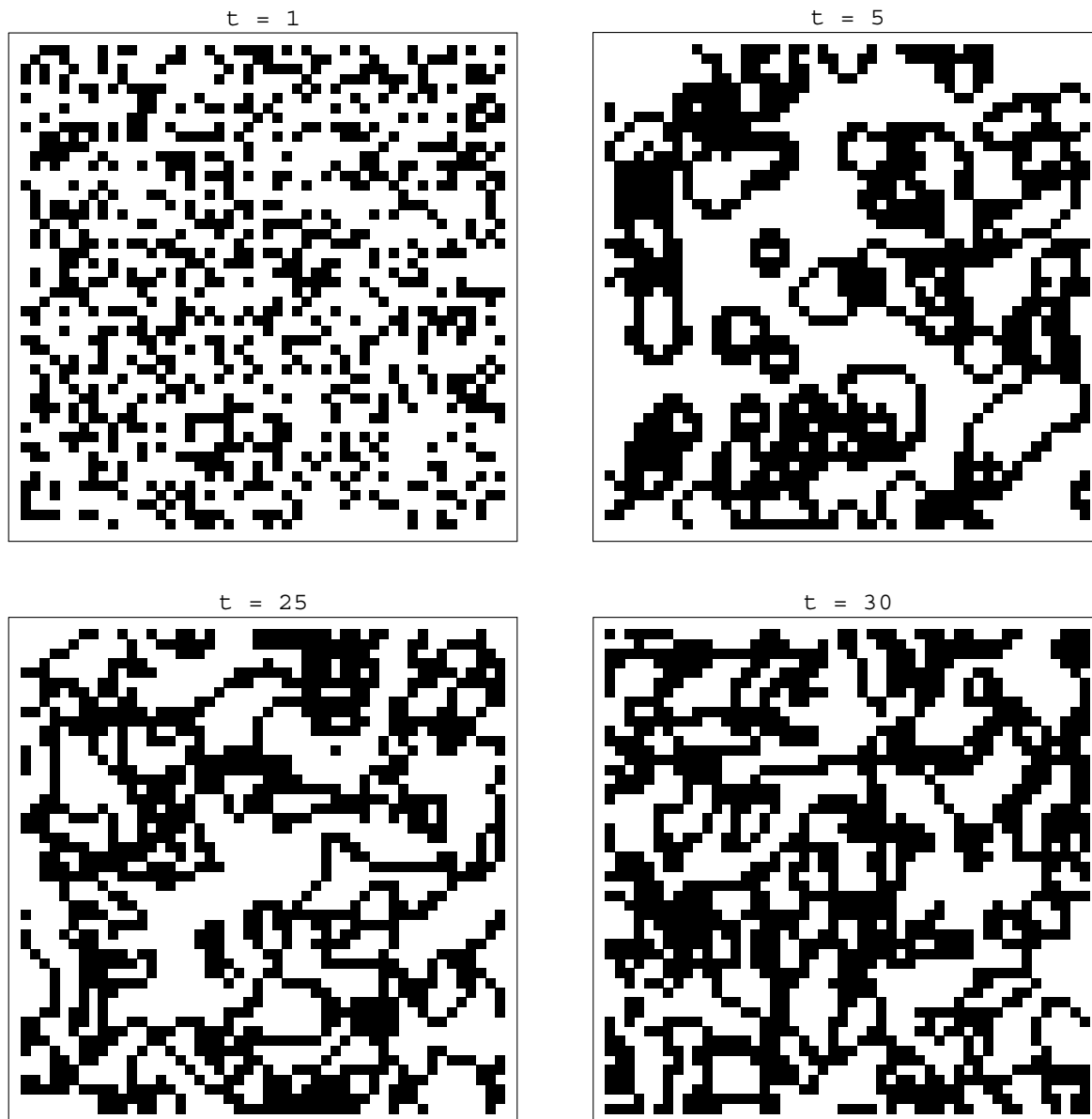


Figura 14:  $k=2$ ,  $h=4$

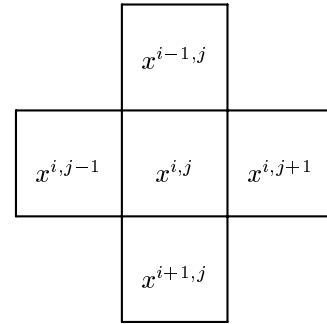
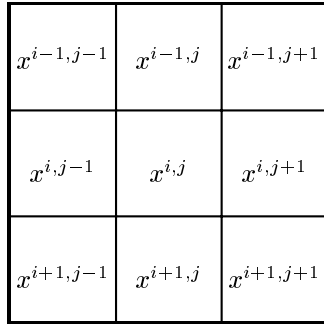


Figura 15: Intorni ad 8 e 5 celle su un reticolo regolare bidimensionale quadrato.

$x^{M N}$	$x^{M 1}$	$x^{M 2}$	$\dots$		$x^{M N-1}$	$x^{M N}$	$x^{M 1}$
$x^{1 N}$	$x^{1 1}$	$x^{1 2}$	$\dots$		$x^{1 N-1}$	$x^{1 N}$	$x^{1 1}$
$x^{2 N}$	$x^{2 1}$	$x^{2 2}$	$\dots$		$x^{2 N-1}$	$x^{2 N}$	$x^{2 1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$x^{M-1 N}$	$x^{M-1 1}$	$x^{M-1 2}$	$\dots$		$x^{M-1 N-1}$	$x^{M-1 N}$	$x^{M-1 1}$
$x^{M N}$	$x^{M 1}$	$x^{M 2}$	$\dots$		$x^{M N-1}$	$x^{M N}$	$x^{M 1}$
$x^{1 N}$	$x^{1 1}$	$x^{1 2}$	$\dots$		$x^{1 N-1}$	$x^{1 N}$	$x^{1 1}$

Figura 16: Reticolo regolare bidimensionale quadrato con condizioni al contorno di tipo toroidale.