

Modelagem de Sistemas Dinâmicos Complexos

Panorama da Física
15 de setembro 2010

Paulo Murilo Castro de Oliveira

pmco@if.uff.br

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense

O Grupo da UFF

O Grupo da UFF

Suzana Moss
Jorge Sá Martins
Jürgen Stilck
Thadeu Penna

Marcio Argollo de Menezes
PMCO

Dietrich Stauffer (Köln)

O Grupo da UFF

Suzana Moss
Jorge Sá Martins
Jürgen Stilck
Thadeu Penna

Marcio Argollo de Menezes
PMCO

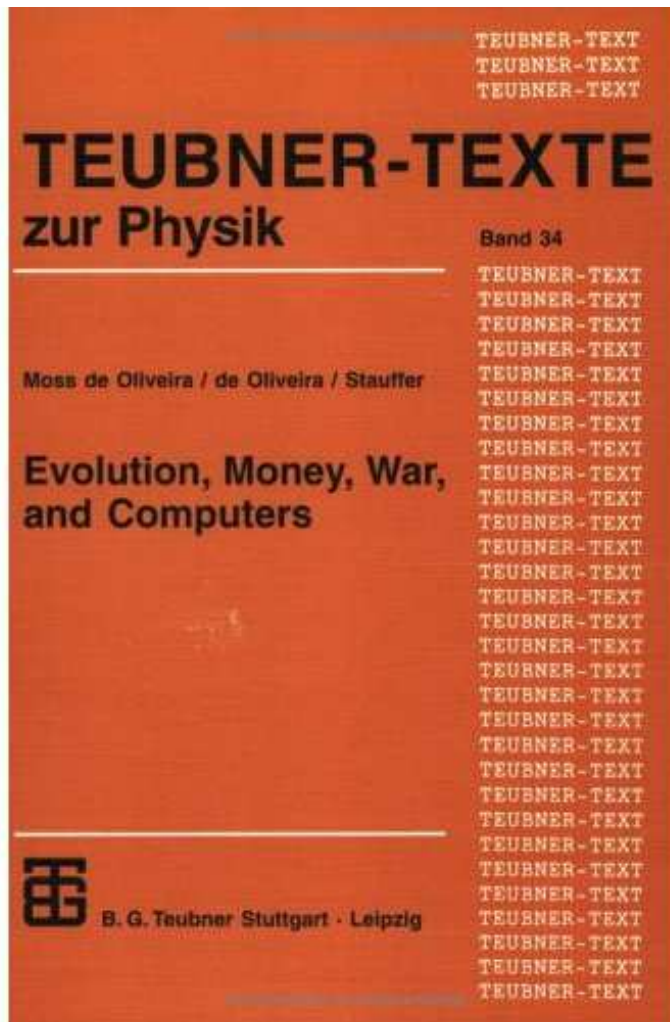
Dietrich Stauffer (Köln)

Gilney Zebende
Adriano Sousa
Solange Martins
Armando Ticona
Karen Burgoa
Veit Schwaemmle (Stüttgart)
Edgardo Brigatti
Klauko Mota
Cinthya Chianca

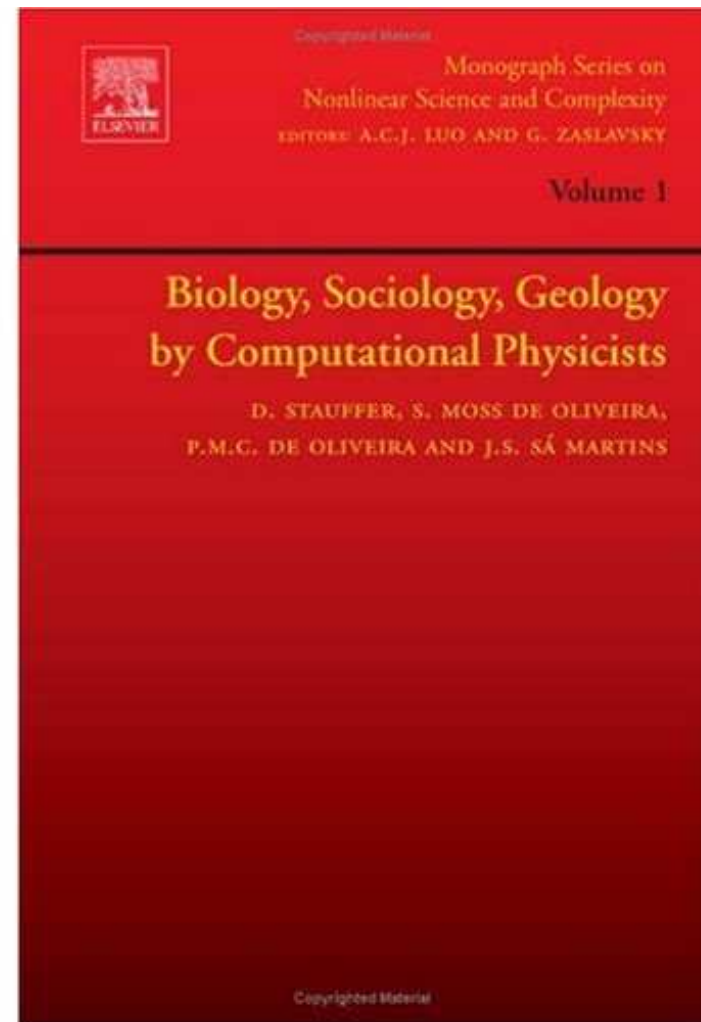
Nuno Crokidakis Peregrino
Carlos Eduardo Galhardo
Orahcio Felicio de Sousa
Alexandre Pereira Lima
Newton Lima Sanches
Angelo Mondaine Calvão
Victor da Fonseca Monteiro
Douglas Santos Ferreira
Marlon Ramos

Dois Livros

Dois Livros



1999



2006

Outro Livro

Outro Livro

12

Coleção CBPF • Tópicos de Física

PAULO MURILO CASTRO DE OLIVEIRA,
SUZANA MARIA MOSS DE OLIVEIRA

FÍSICA EM COMPUTADORES

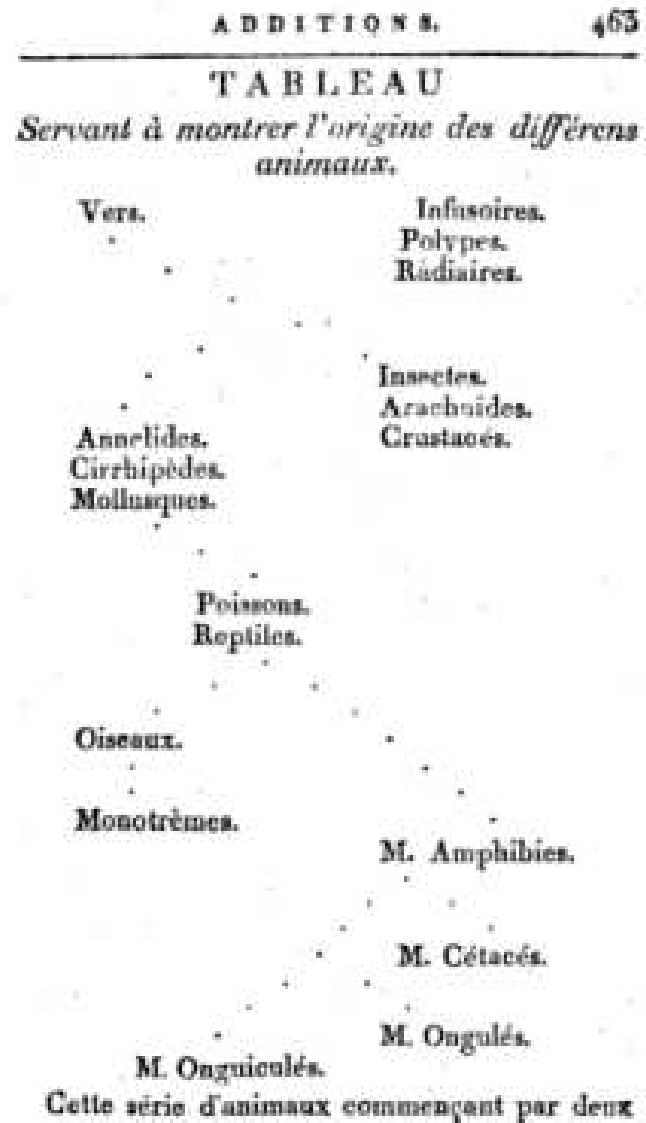
O presente texto apresenta uma série de exemplos tratados no contexto da Física Computacional. São apresentados num crescendo de complexidade, de forma que estudantes de graduação de qualquer área técnica (não apenas Física) serão capazes de compreender todo o texto. Embora aplicados diretamente a exemplos concretos, os métodos são completamente gerais. Desta forma, o leitor poderá aplicá-los a seus próprios empreendimentos científicos. Primeiro, a vertente tradicional da solução numérica de equações matemáticas é a apresentada. Gradativamente, a vertente mais moderna da simulação de modelos de agentes é introduzida, onde temas como caos, fractais e dinâmica complexa se inserem.



2010

Topologia da Evolução

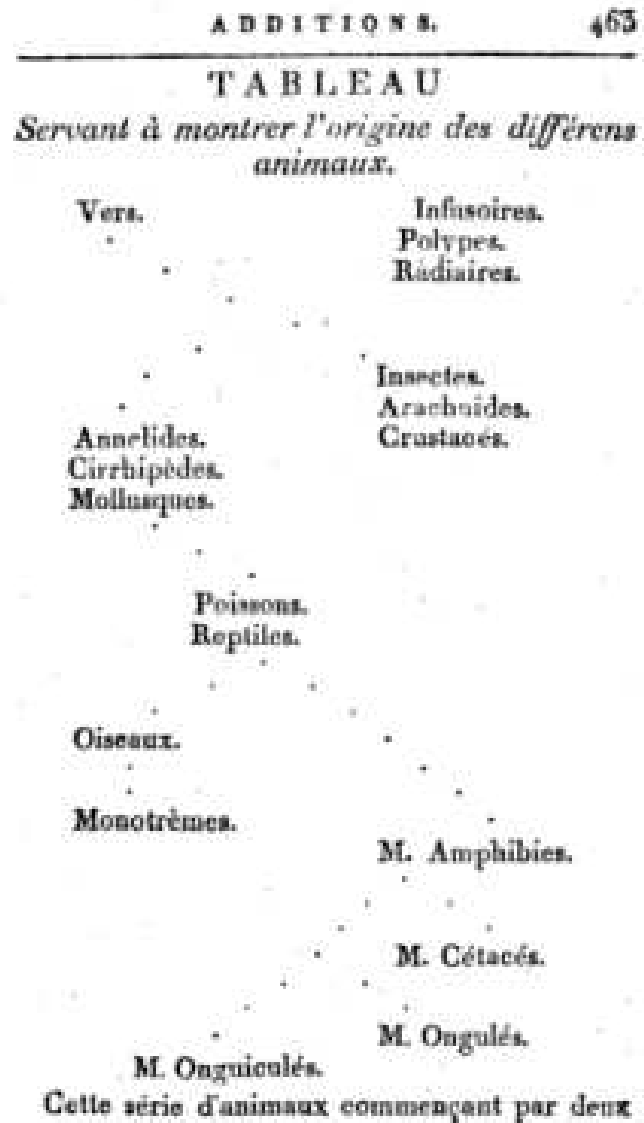
Topologia da Evolução



Há 200 anos:

Lamarck, La Philosophie Zoologique II (1809)

Topologia da Evolução

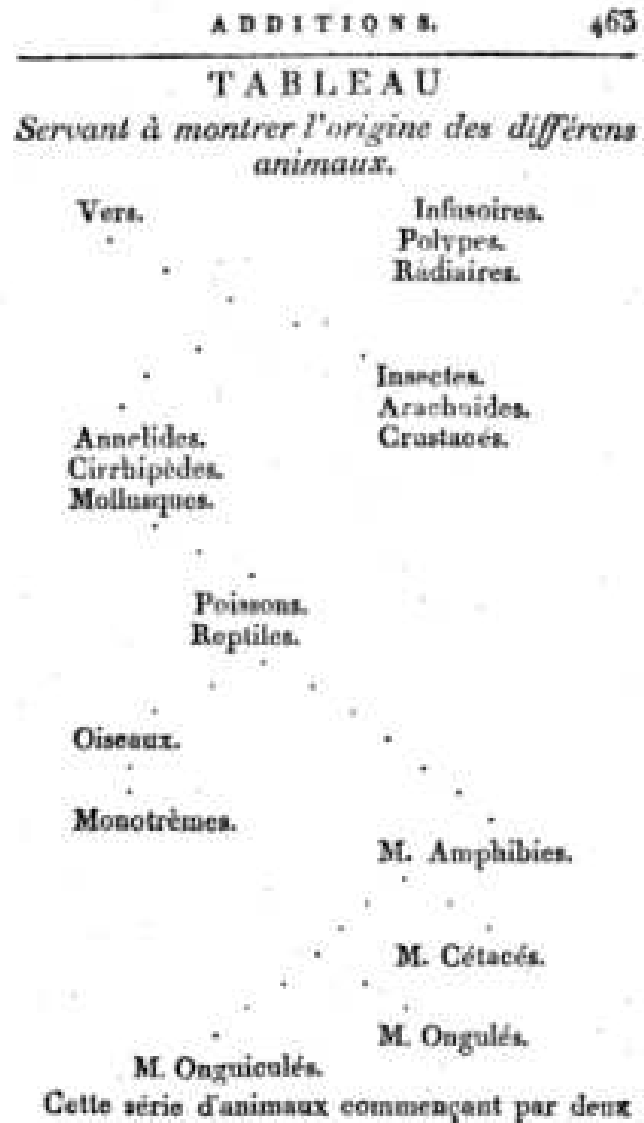


Há 200 anos:

Lamarck, La Philosophie Zoologique II (1809)

Nasceu Darwin

Topologia da Evolução



Há 200 anos:

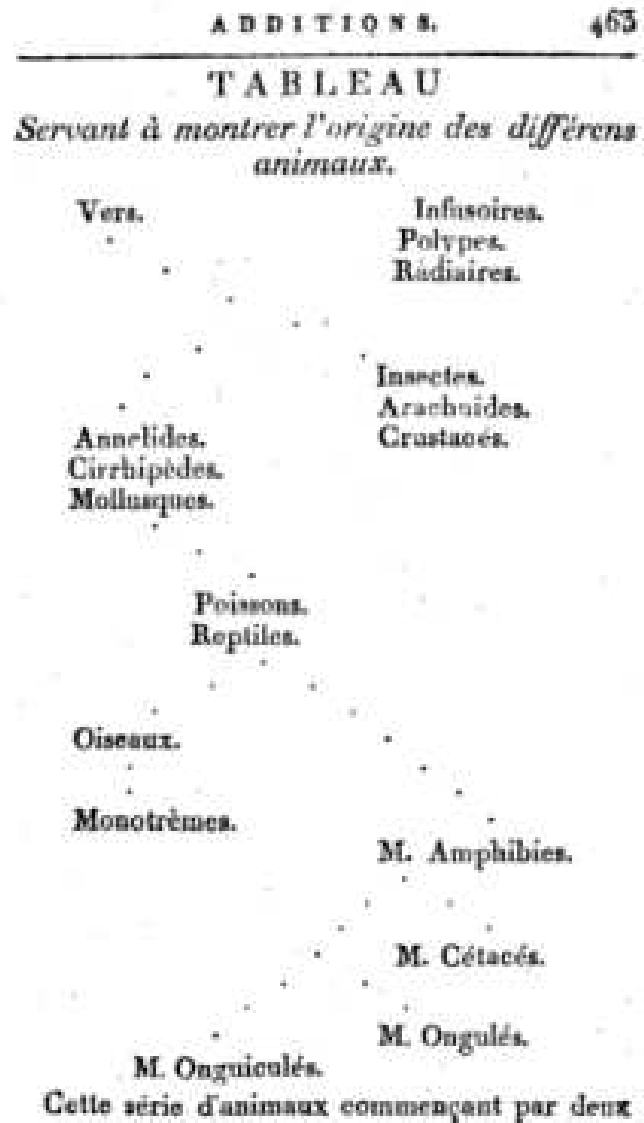
Lamarck, La Philosophie Zoologique II (1809)

Nasceu Darwin

Há 150 anos:

Darwin, Origin of Species (1859)

Topologia da Evolução



Há 200 anos:

Lamarck, La Philosophie Zoologique II (1809)

Nasceu Darwin

Há 150 anos:

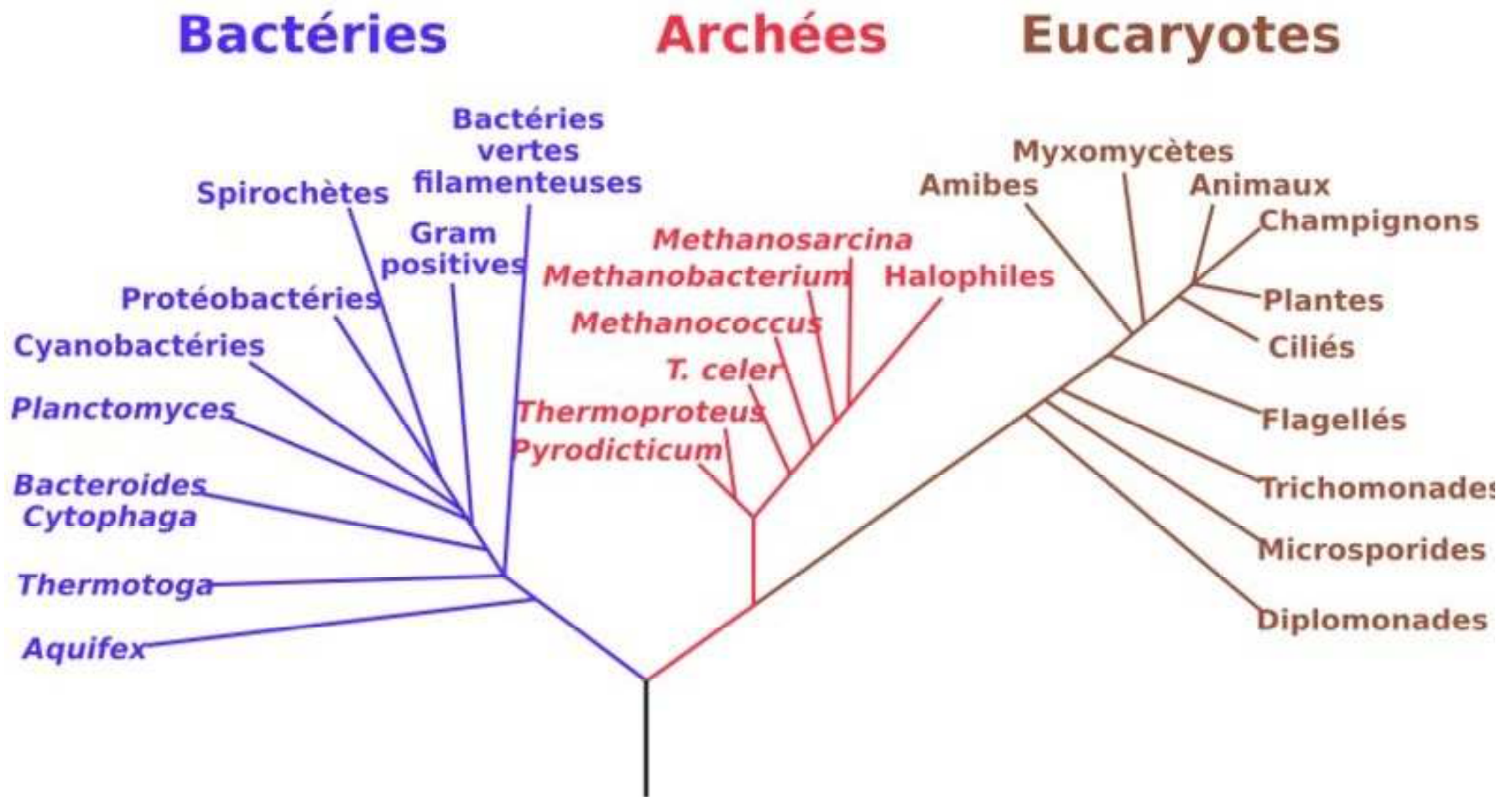
Darwin, Origin of Species (1859)

Porque não existe uma equação de Darwin?
Pode existir?

200 Anos Depois

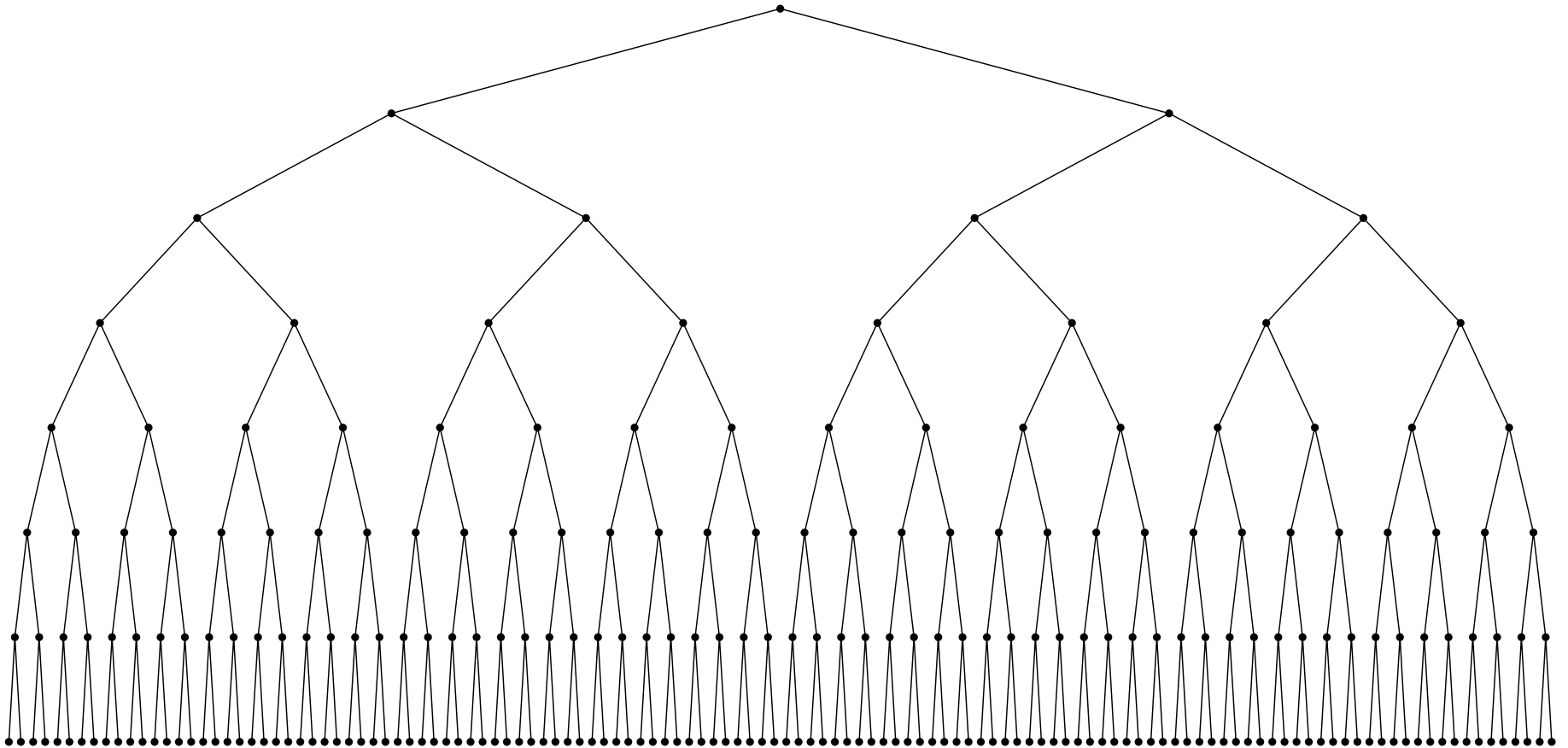
200 Anos Depois

Arbre phylogénétique de la vie

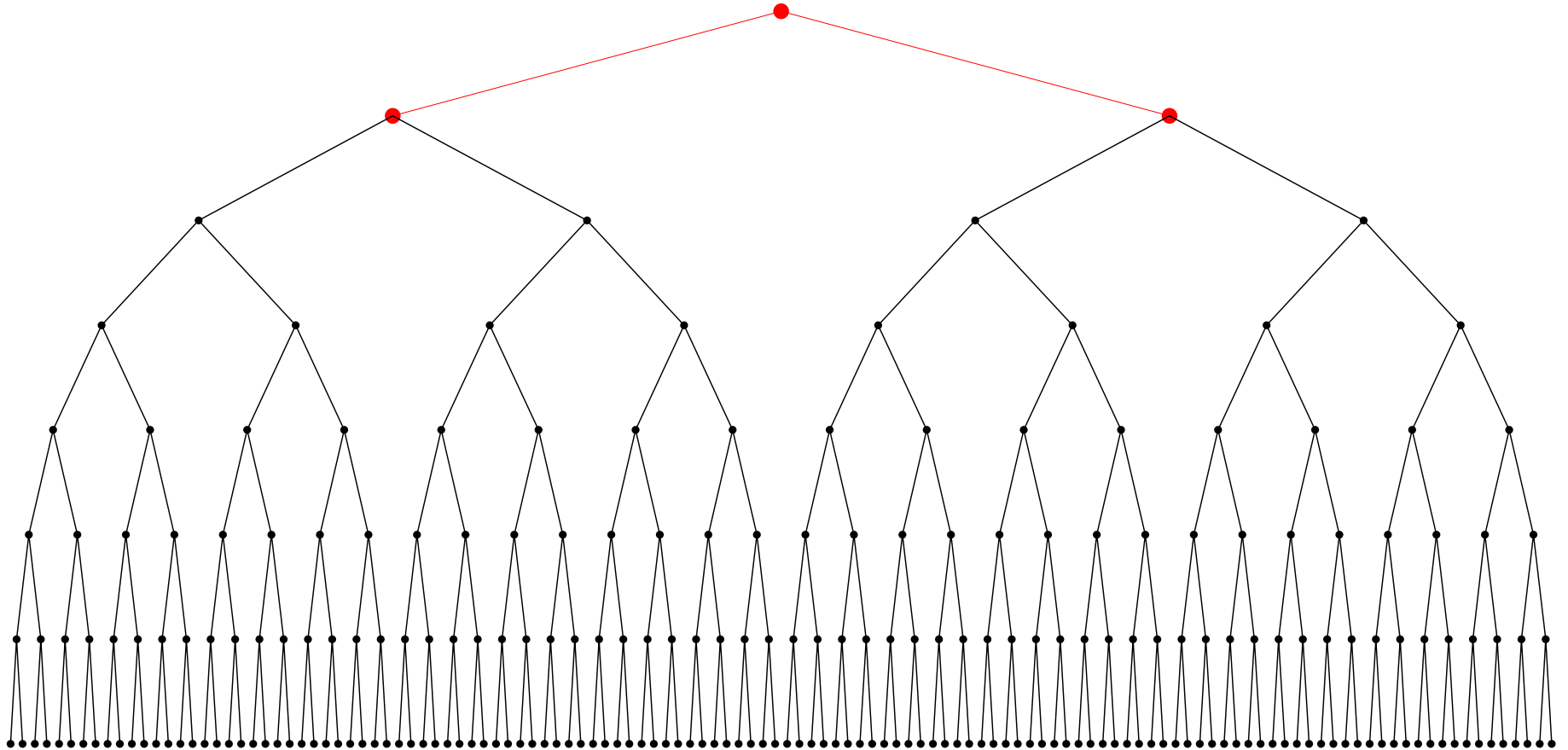


Dinâmica da Árvore

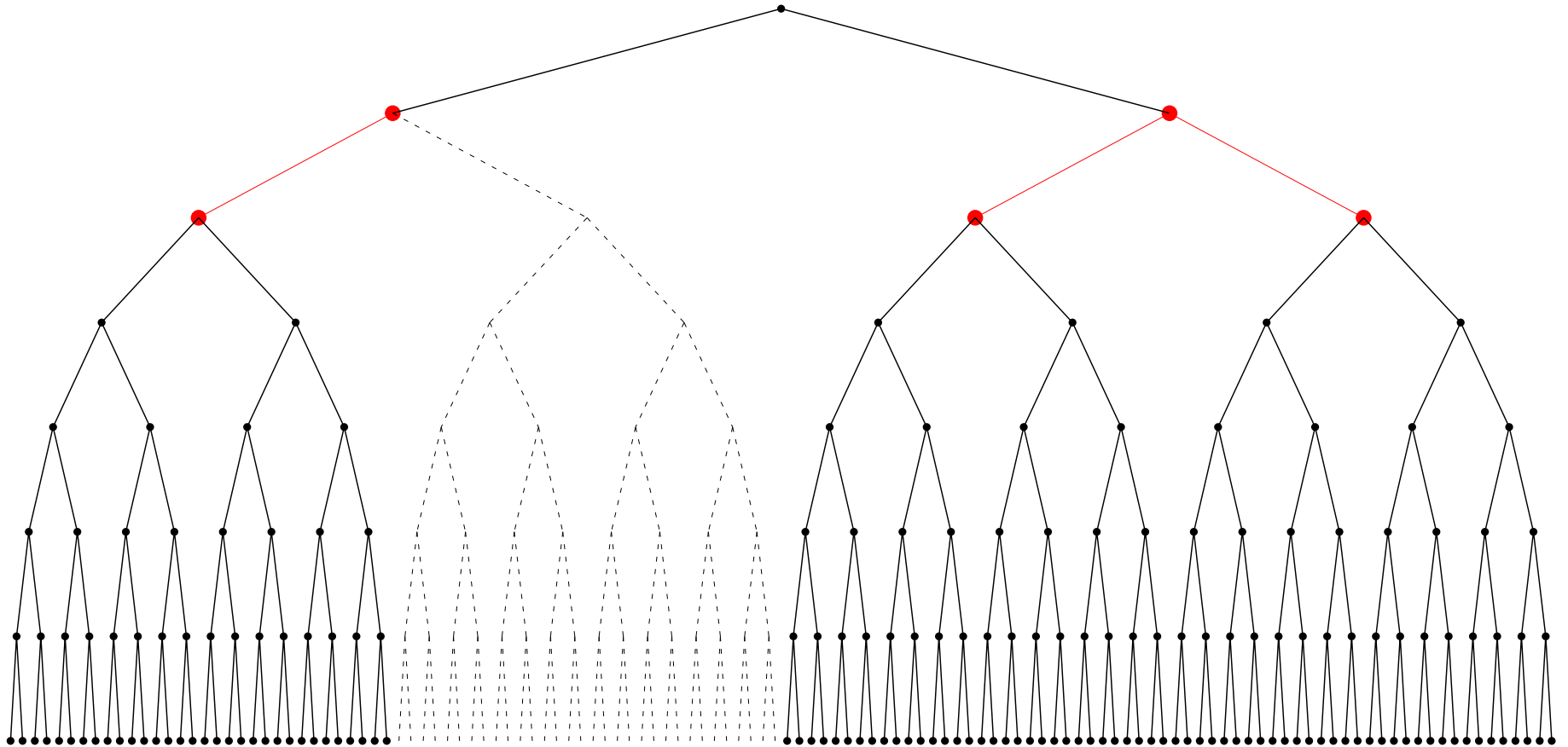
Dinâmica da Árvore



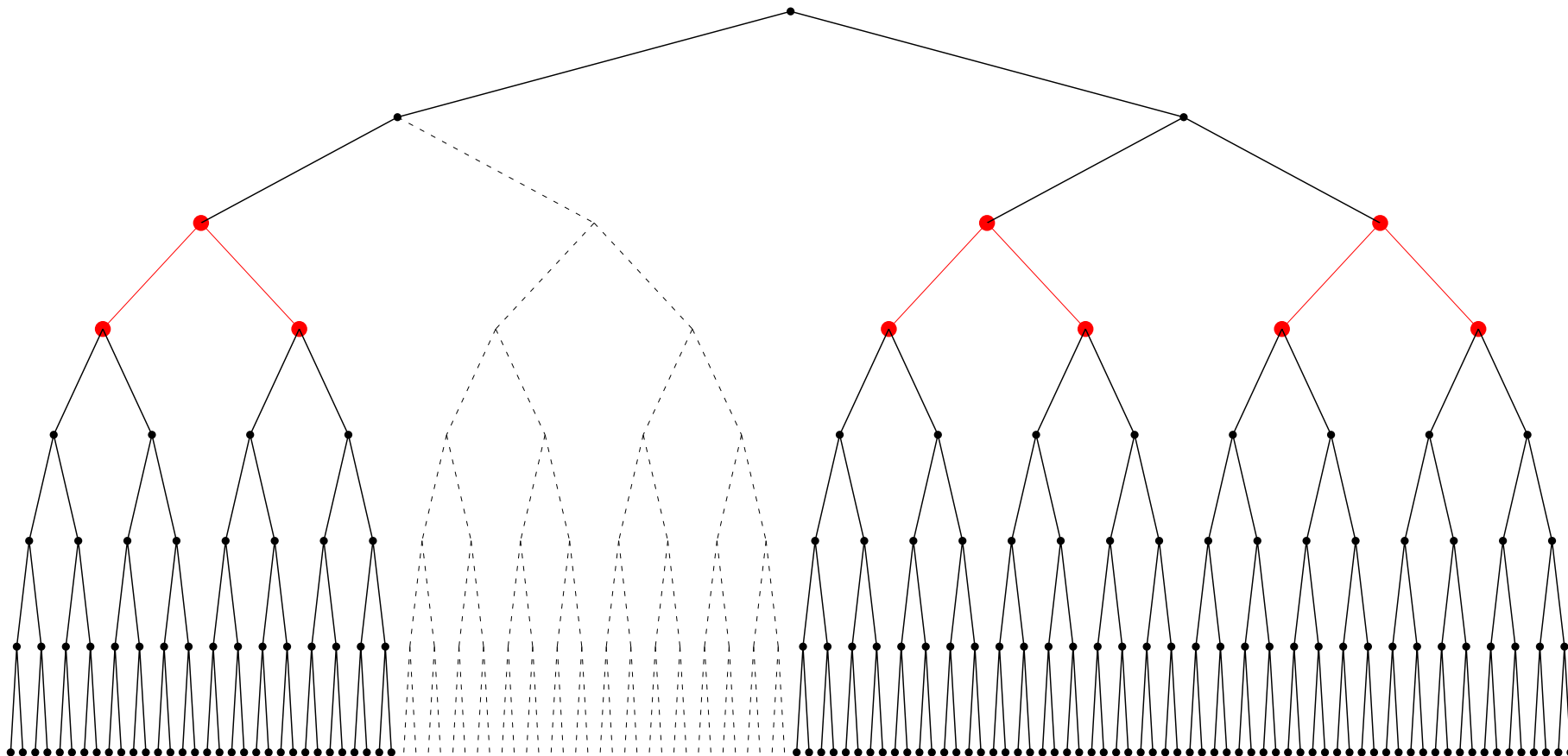
Primeira Geração



Segunda Geração

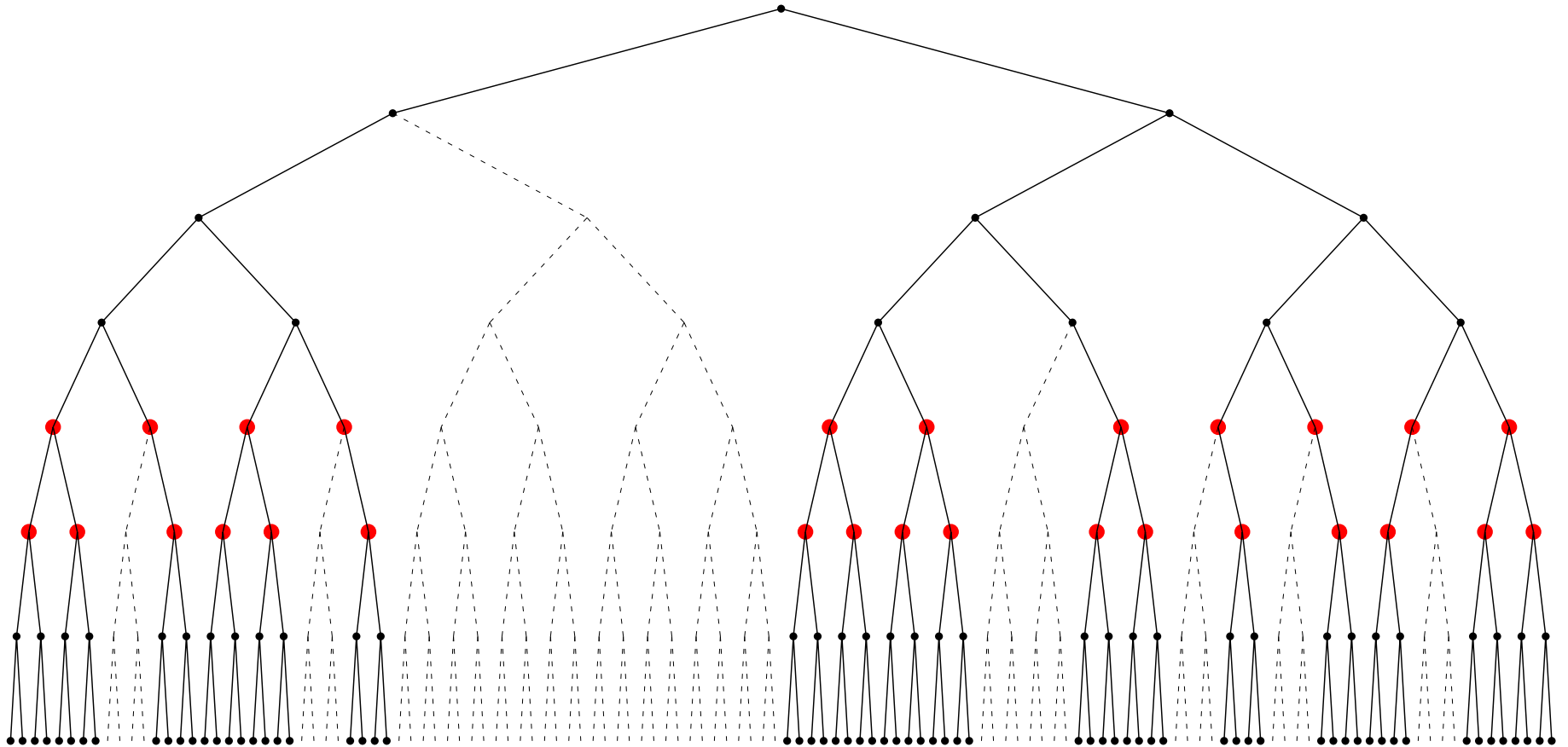


Terceira Geração

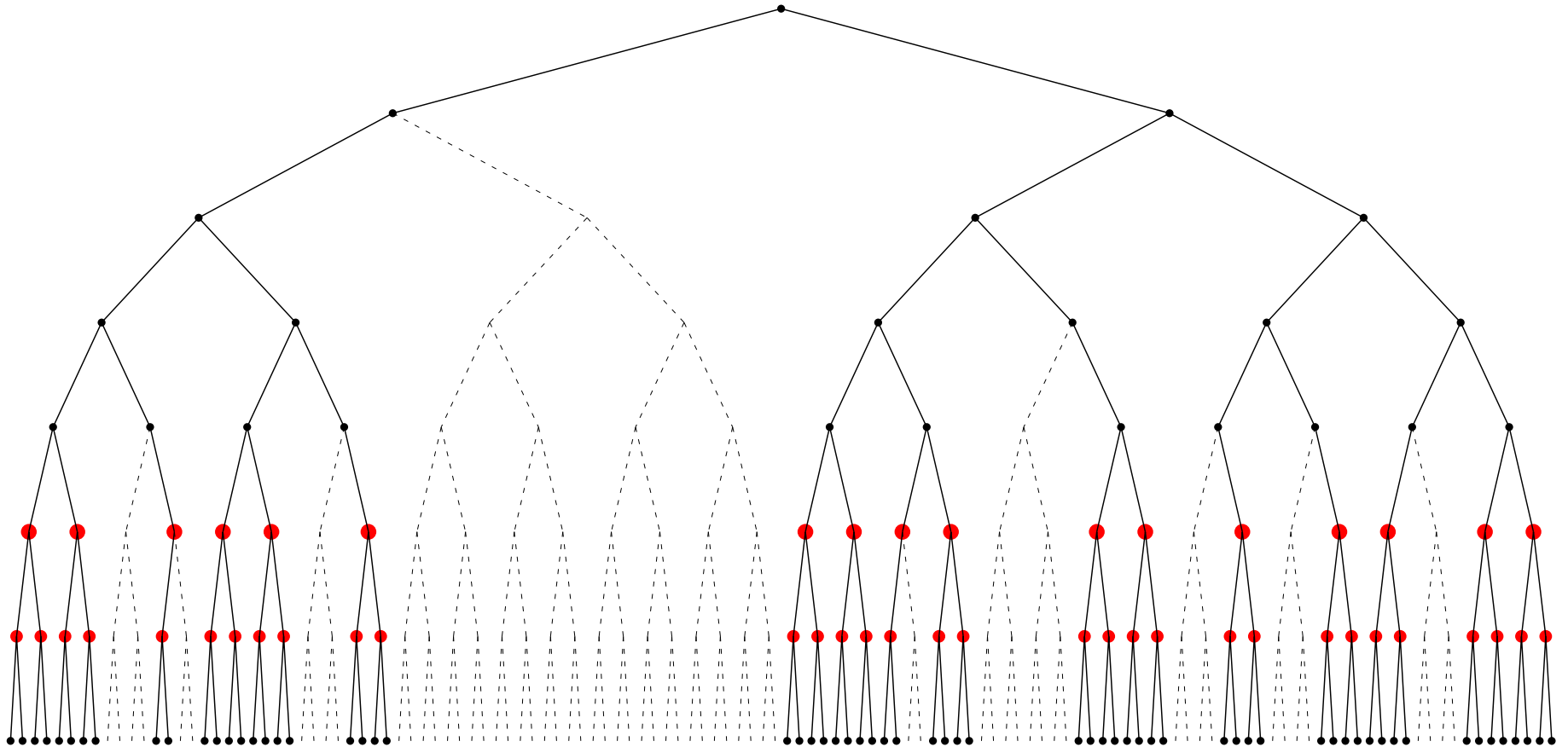




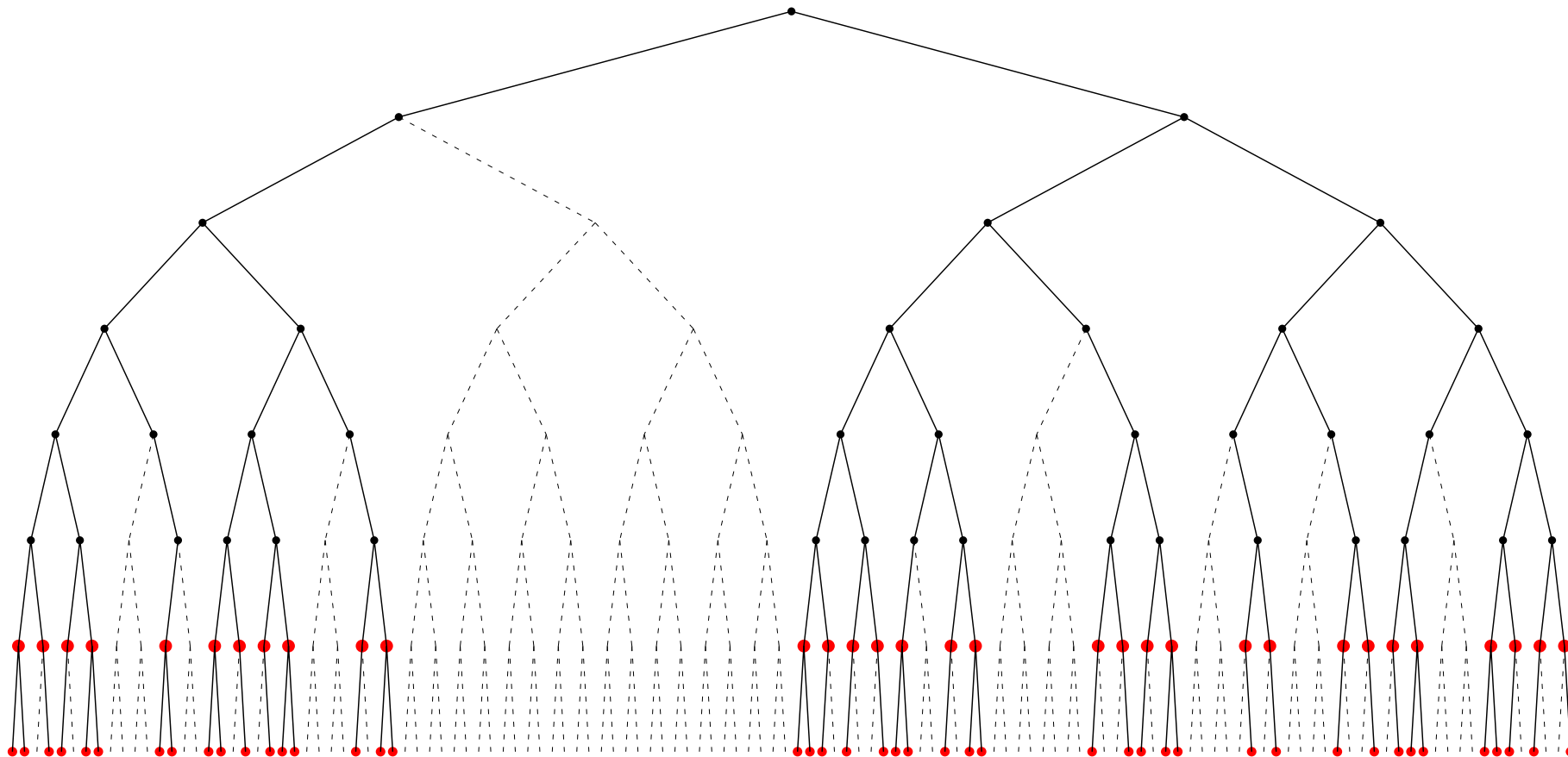
Quinta Geração



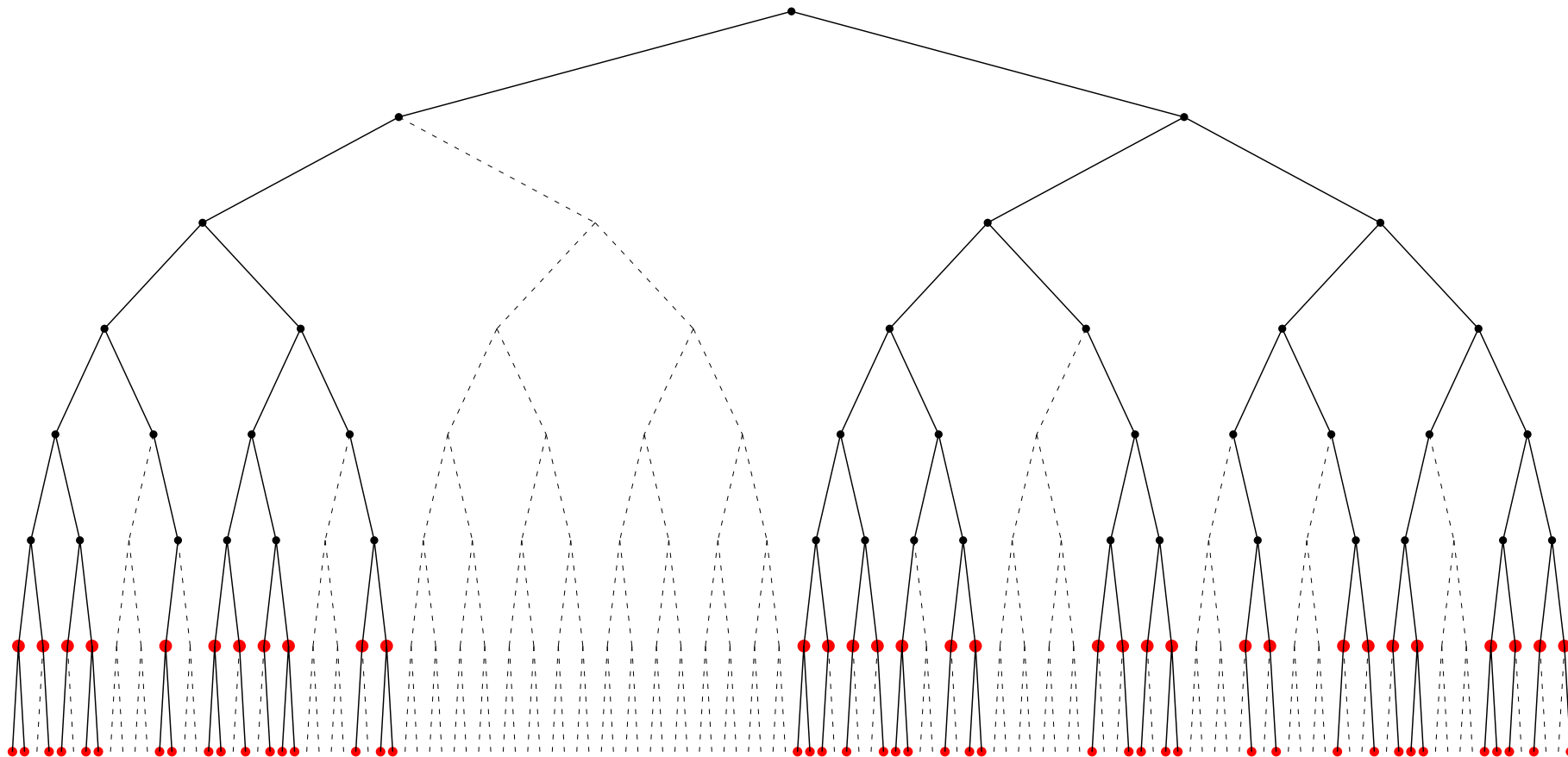
Sexta Geração



Sétima Geração

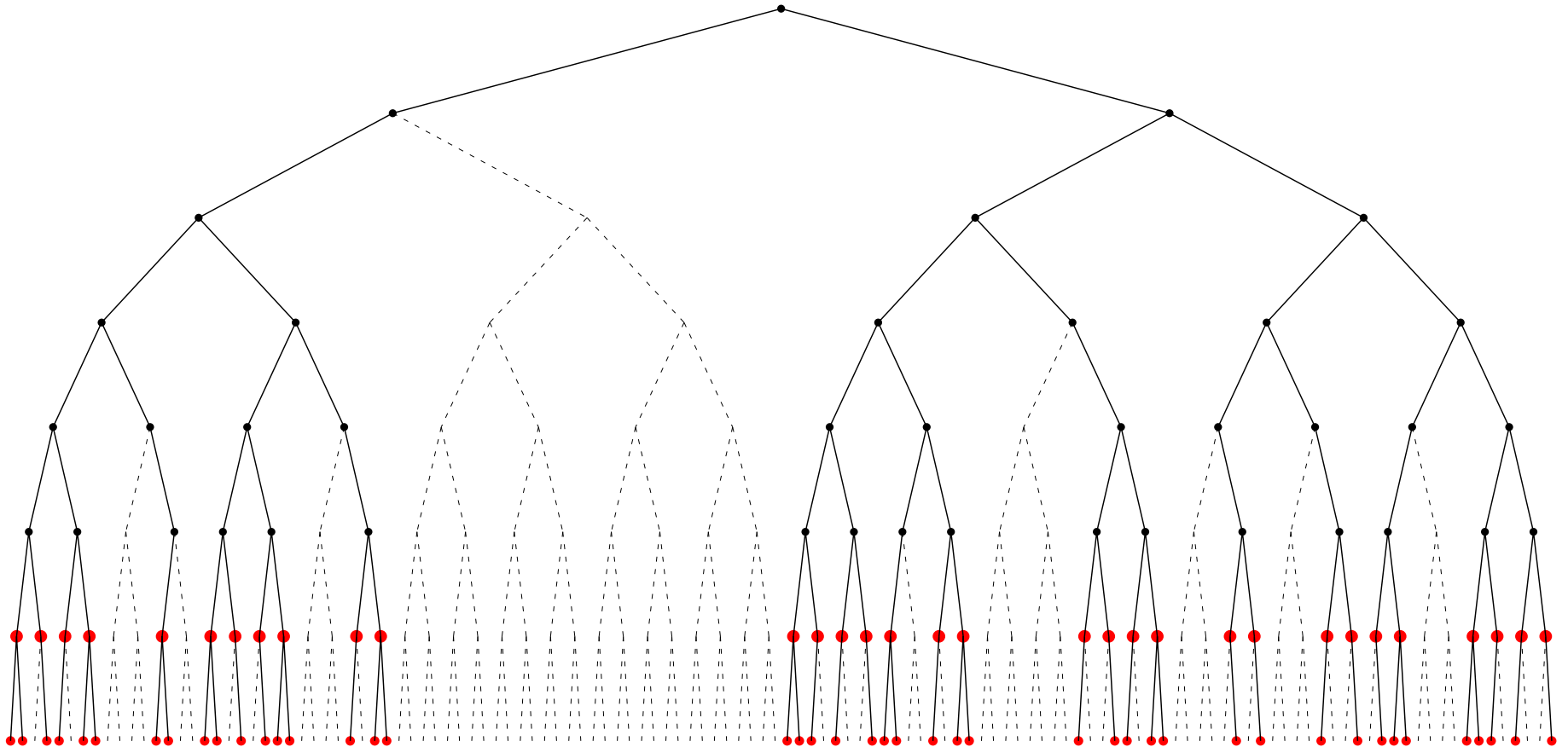


Sétima Geração



Não ergódico!

Sétima Geração



Não ergódico!

Equação de Darwin?

Exemplos de Sistemas Complexos

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração
- Conflitos sociais e a própria [História](#)

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração
- Conflitos sociais e a própria [História](#)
- A guerra fria e a “globalização” que a sucedeu

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração
- Conflitos sociais e a própria [História](#)
- A guerra fria e a “globalização” que a sucedeu
- A internet

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração
- Conflitos sociais e a própria [História](#)
- A guerra fria e a “globalização” que a sucedeu
- A internet
- Os terremotos

Exemplos de Sistemas Complexos

- A evolução das espécies e a própria Biologia
- A evolução da cultura e da linguagem
- A evolução do próprio universo
- A economia de mercado
- Tecnologias de alto grau de integração
- Conflitos sociais e a própria [História](#)
- A guerra fria e a “globalização” que a sucedeu
- A internet
- Os terremotos
- Os vidros e a dinâmica dos fluidos

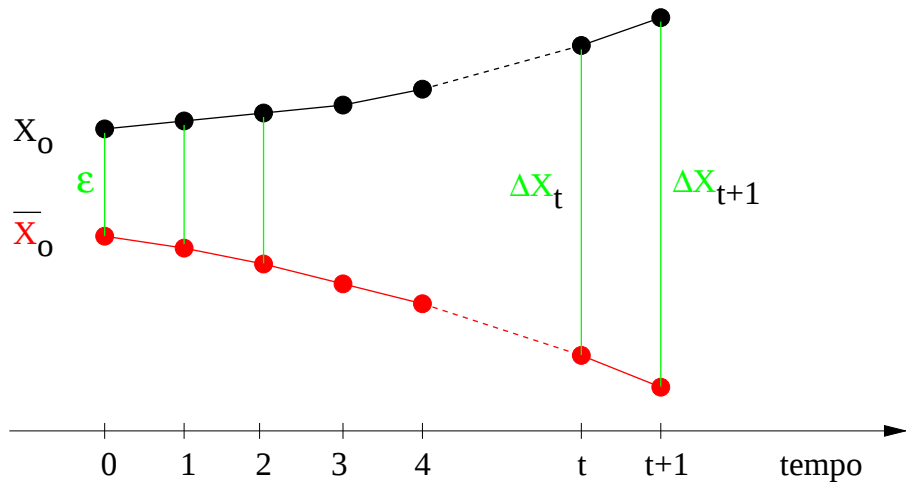
Dinâmica de Markov

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$

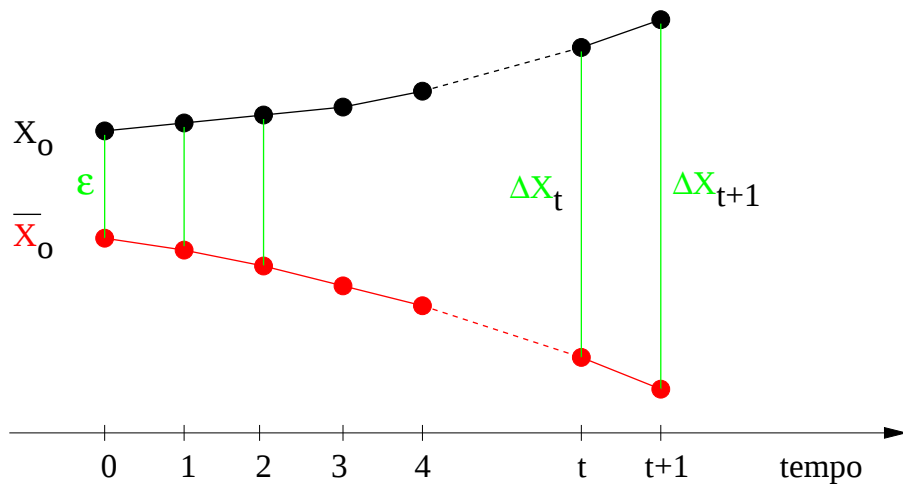
Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$

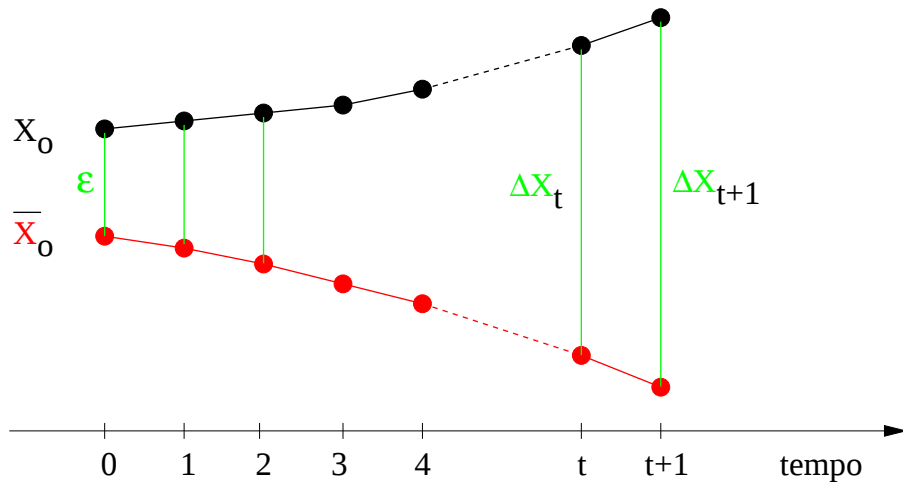


$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t}$$

λ é o expoente de Lyapunov

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



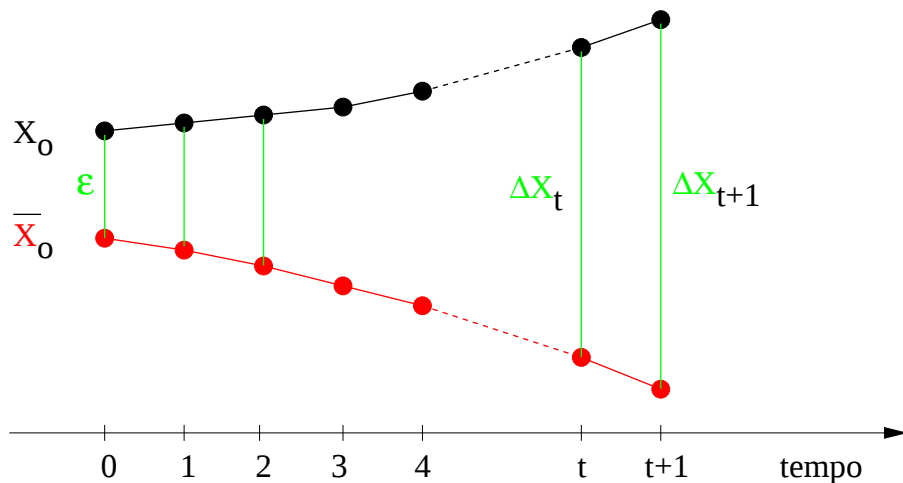
$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t}$$

λ é o expoente de Lyapunov

$\lambda > 0$: sistema caótico

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t}$$

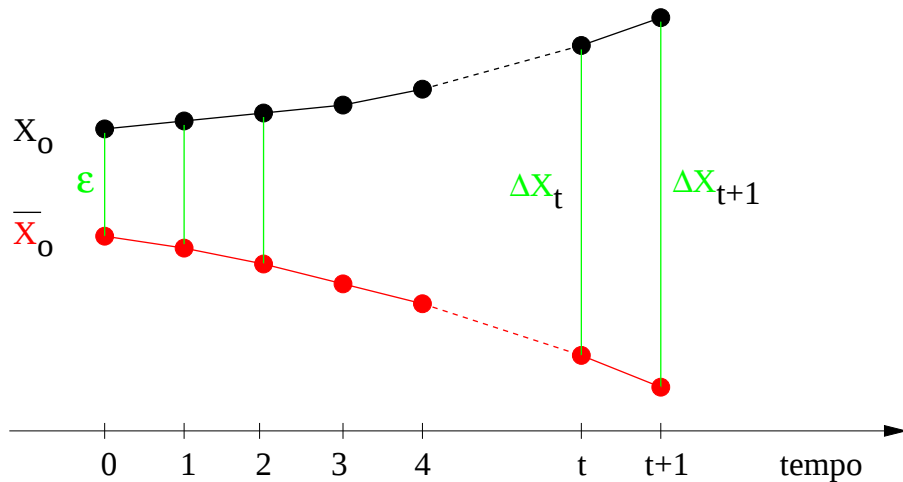
λ é o expoente de Lyapunov

$\lambda > 0$: sistema caótico

$\lambda < 0$: sistema simples

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t}$$

λ é o expoente de Lyapunov

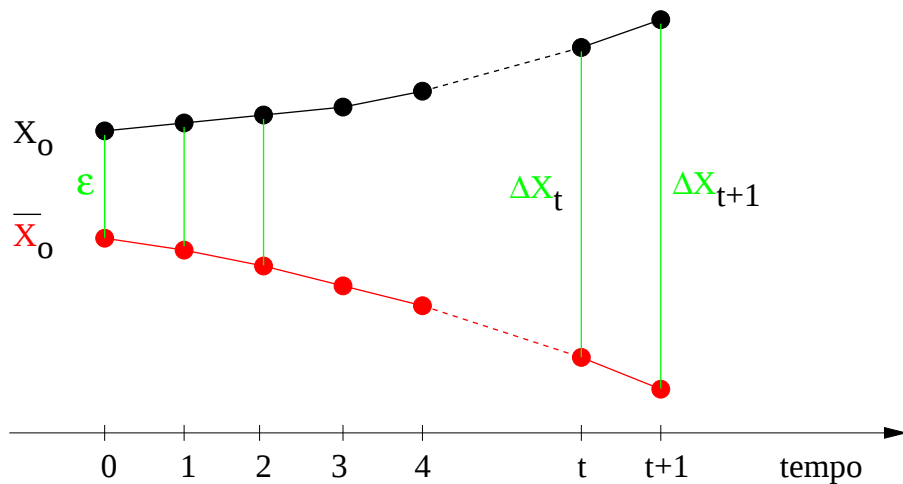
$\lambda > 0$: sistema caótico

$\lambda < 0$: sistema simples

complexo: $\lambda = 0$

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t} [(t+1)^\alpha + \dots]$$

λ é o expoente de Lyapunov

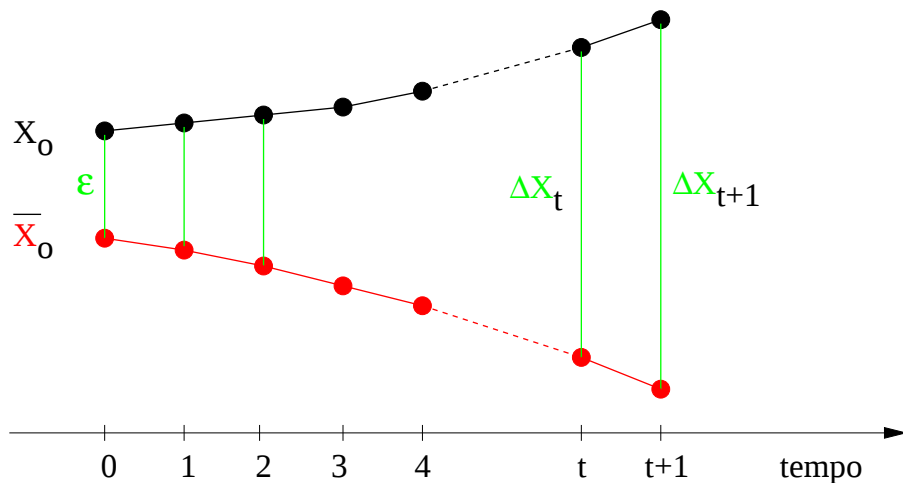
$\lambda > 0$: sistema caótico

$\lambda < 0$: sistema simples

complexo: $\lambda = 0$

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t} [(t+1)^\alpha + \dots]$$

λ é o expoente de Lyapunov

$\lambda > 0$: sistema caótico

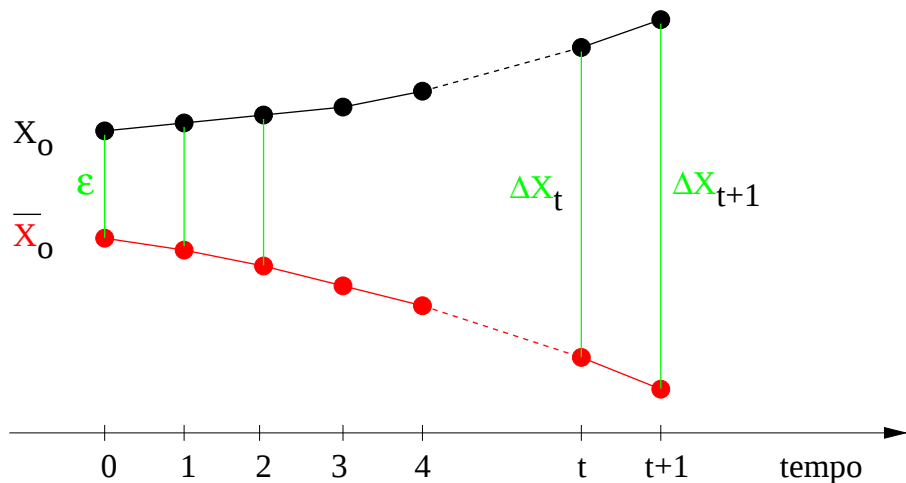
$\lambda < 0$: sistema simples

complexo: $\lambda = 0$

Desafio: Sendo X_t Markoviano, ΔX_t também é ?

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t} [(t+1)^\alpha + \dots]$$

λ é o expoente de Lyapunov

$\lambda > 0$: sistema caótico

$\lambda < 0$: sistema simples

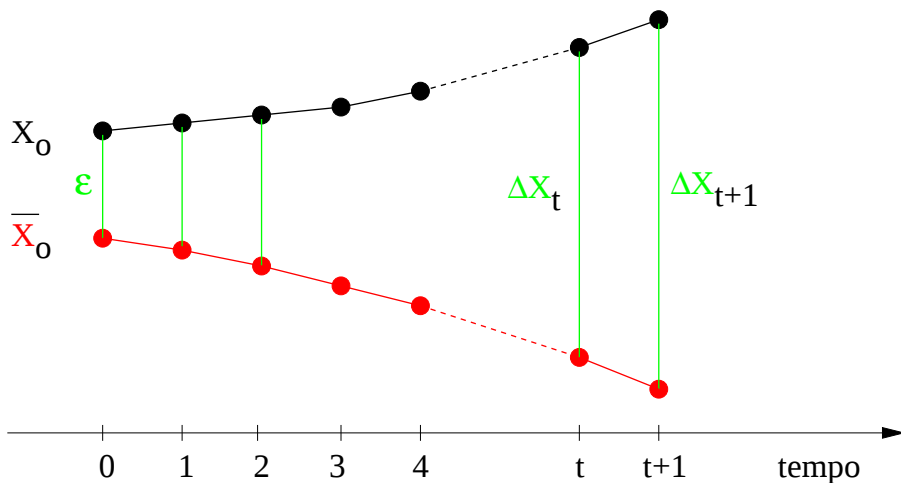
complexo: $\lambda = 0$

Desafio: Sendo X_t Markoviano, ΔX_t também é ?

● **SIM**, caso $\lambda \neq 0$: $\Delta X_{t+1} = e^\lambda \Delta X_t = g(\Delta X_t)$

Dinâmica de Markov

O estado atual depende apenas do anterior $X_{t+1} = f(X_t)$



$$\Delta X_t = \epsilon e^{\lambda t} [(t+1)^\alpha + \dots]$$

λ é o expoente de Lyapunov

$\lambda > 0$: sistema caótico

$\lambda < 0$: sistema simples

complexo: $\lambda = 0$

Desafio: Sendo X_t Markoviano, ΔX_t também é ?

● **SIM**, caso $\lambda \neq 0$: $\Delta X_{t+1} = e^\lambda \Delta X_t = g(\Delta X_t)$

● **NÃO**, se $\lambda = 0$: $\Delta X_{t+1} = (\epsilon^{1/\alpha} + \Delta X_t^{1/\alpha})^\alpha = g(\epsilon, \Delta X_t)$

Características Fundamentais

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Consequências:

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Consequências:

- ausência de equações diferenciais (pelo menos as lineares)

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Consequências:

- ausência de equações diferenciais (pelo menos as lineares)
- impossibilidade de médias parciais sucessivas

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Consequências:

- ausência de equações diferenciais (pelo menos as lineares)
- impossibilidade de médias parciais sucessivas
- problemas não perturbativos

Características Fundamentais

- Memória de longo prazo
- Correlações de longo alcance
- Perda de ergodicidade

Consequências:

- ausência de equações diferenciais (pelo menos as lineares)
- impossibilidade de médias parciais sucessivas
- problemas não perturbativos

Resumo: A estratégia reducionista (dividir o sistema em pedaços menores ou o tempo em fatias sucessivas) está fora de cogitações. P.W. Anderson: “More is Different!”

A Solução Possível

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente, **segundo regras dinâmicas predeterminadas (o modelo)**

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente, **segundo regras dinâmicas predeterminadas (o modelo)**
- usam-se números aleatórios para gerar contingências

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente, **segundo regras dinâmicas predeterminadas (o modelo)**
- usam-se números aleatórios para gerar contingências
- medem-se, a cada passo, as grandezas de interesse para estatística posterior

A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente, **segundo regras dinâmicas predeterminadas (o modelo)**
- usam-se números aleatórios para gerar contingências
- medem-se, a cada passo, as grandezas de interesse para estatística posterior
- repete-se várias vezes, desde o início, sem médias

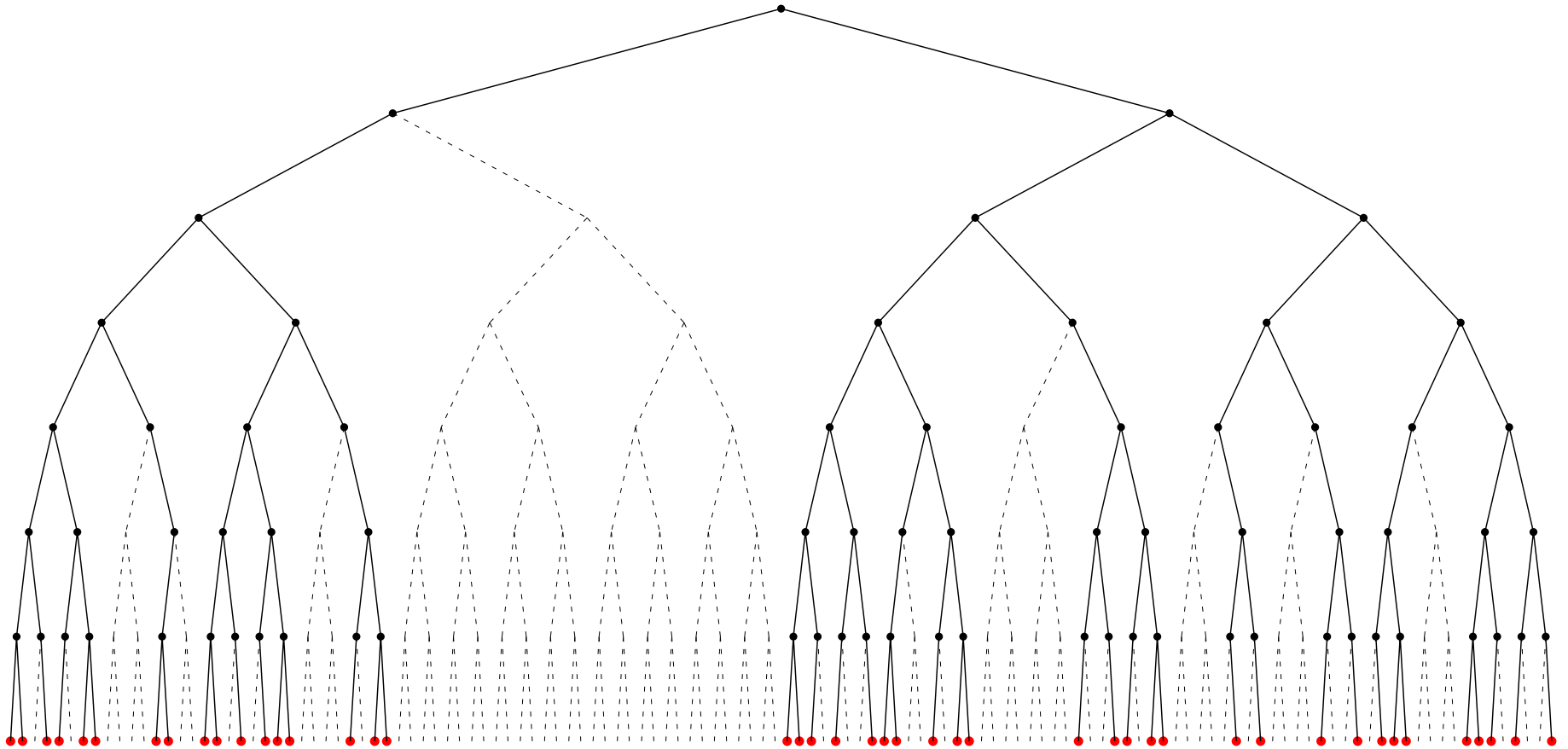
A Solução Possível

Modelos Dinâmicos de Agentes (Populações)

- armazena-se na memória do computador as características de cada indivíduo/agente
- atualizam-se estas características de acordo com o estado dos demais agentes e o ambiente, **segundo regras dinâmicas predeterminadas (o modelo)**
- usam-se números aleatórios para gerar contingências
- medem-se, a cada passo, as grandezas de interesse para estatística posterior
- repete-se várias vezes, desde o início, sem médias
- **só depois de armazenar várias realizações completas (desde o início), médias estatísticas são tomadas**

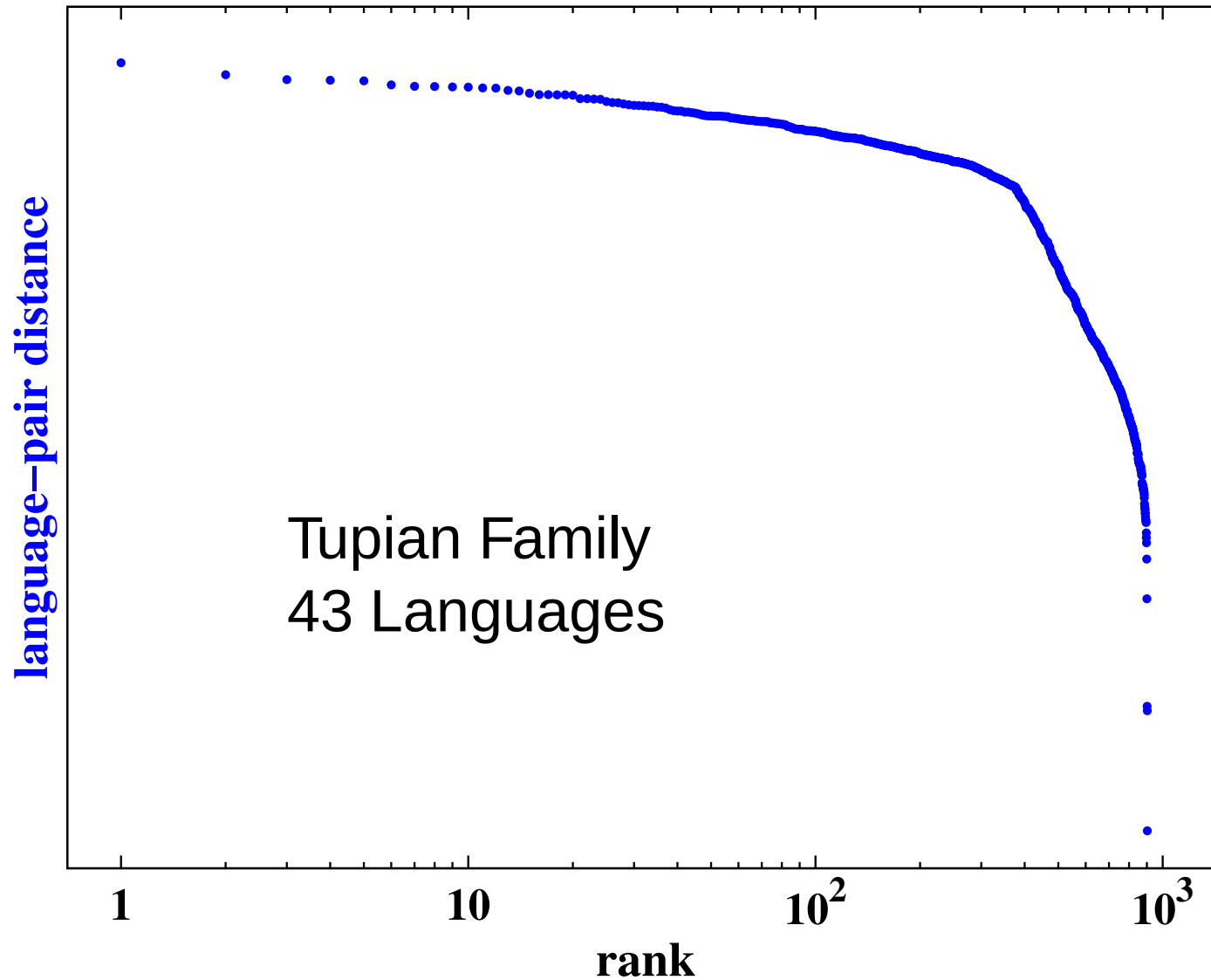
Evolução das Linguagens Faladas

Evolução das Linguagens Faladas



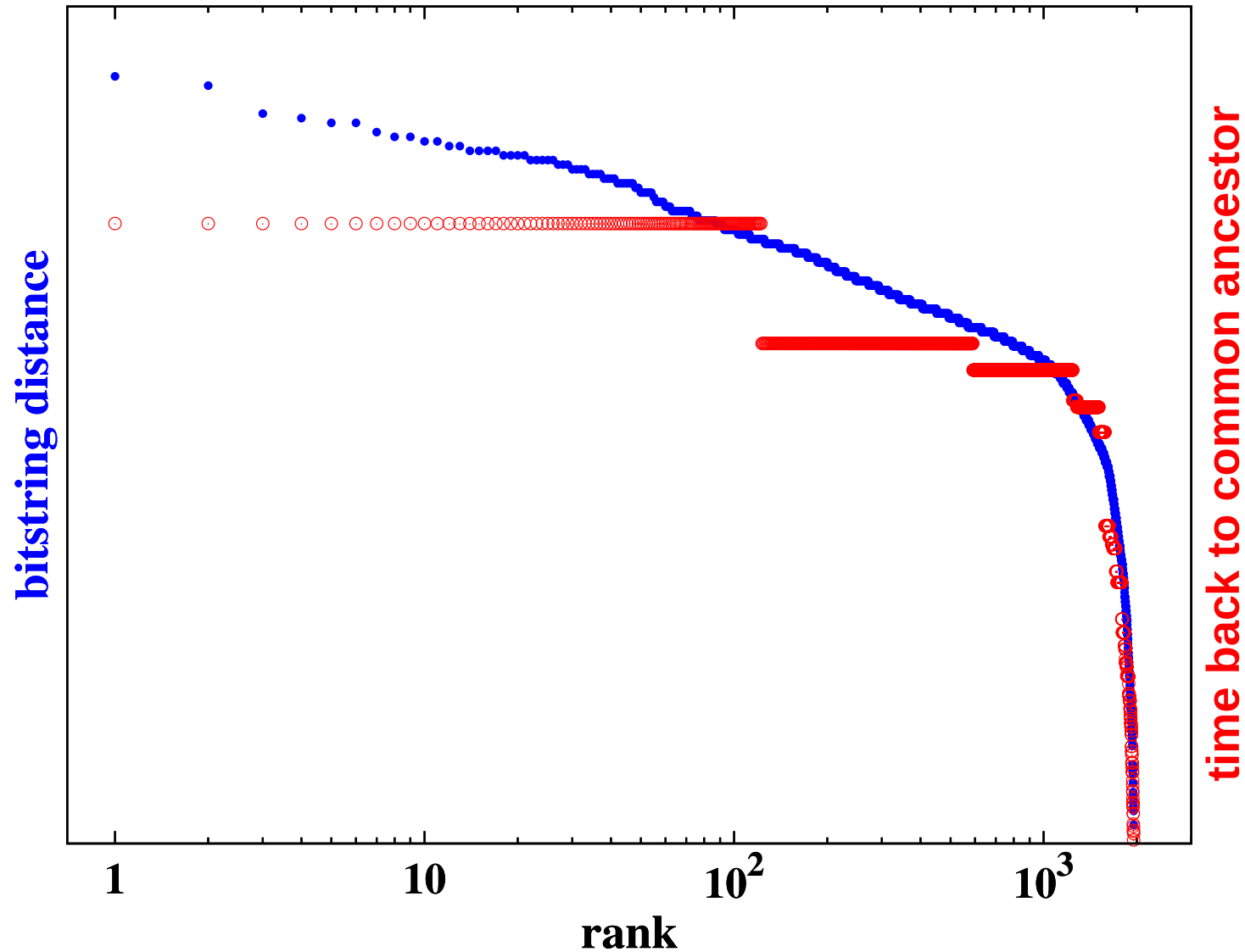
“Ranking” de Distâncias

“Ranking” de Distâncias



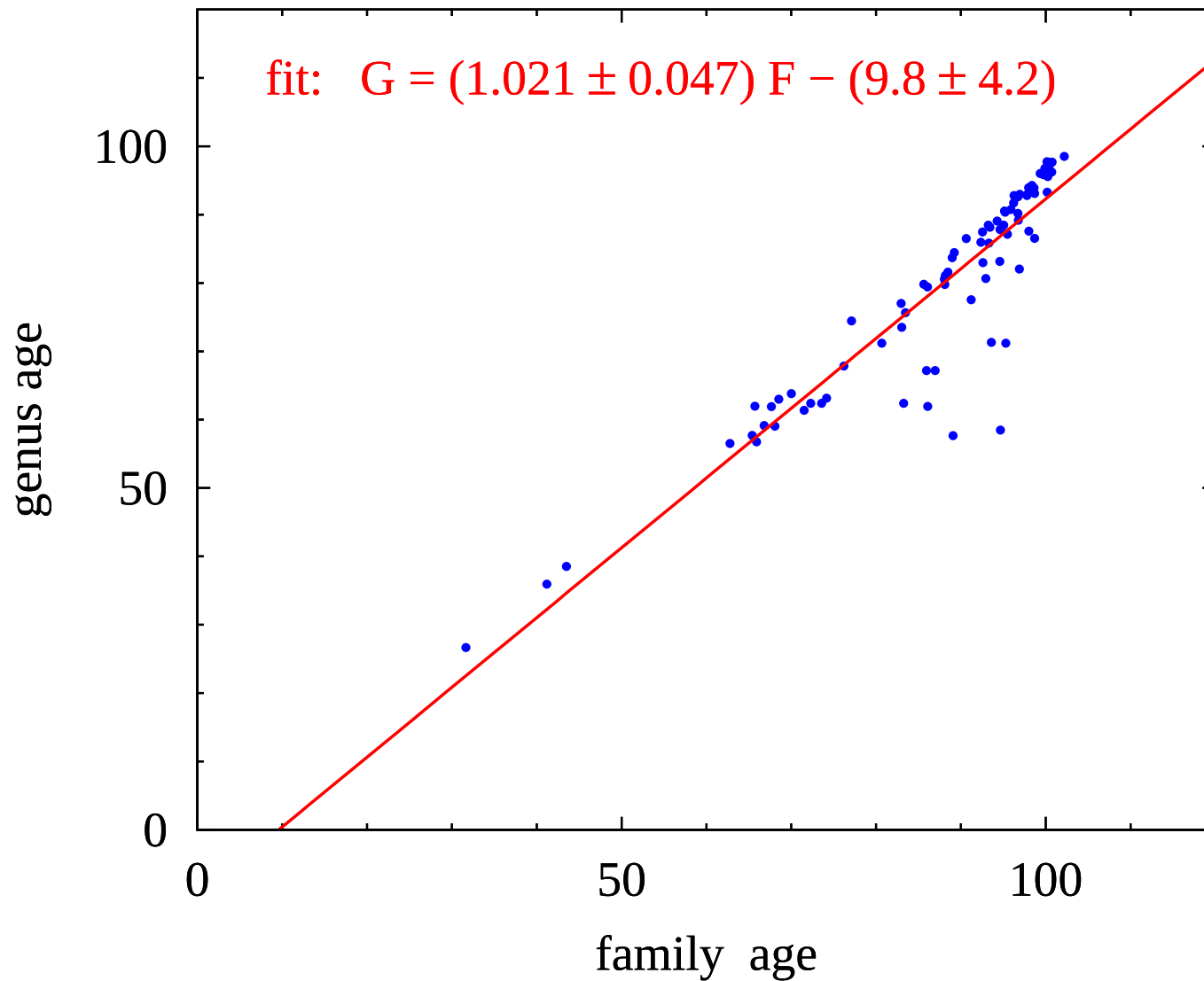
Explicação: Gêneros (Modelo)

Explicação: Gêneros (Modelo)

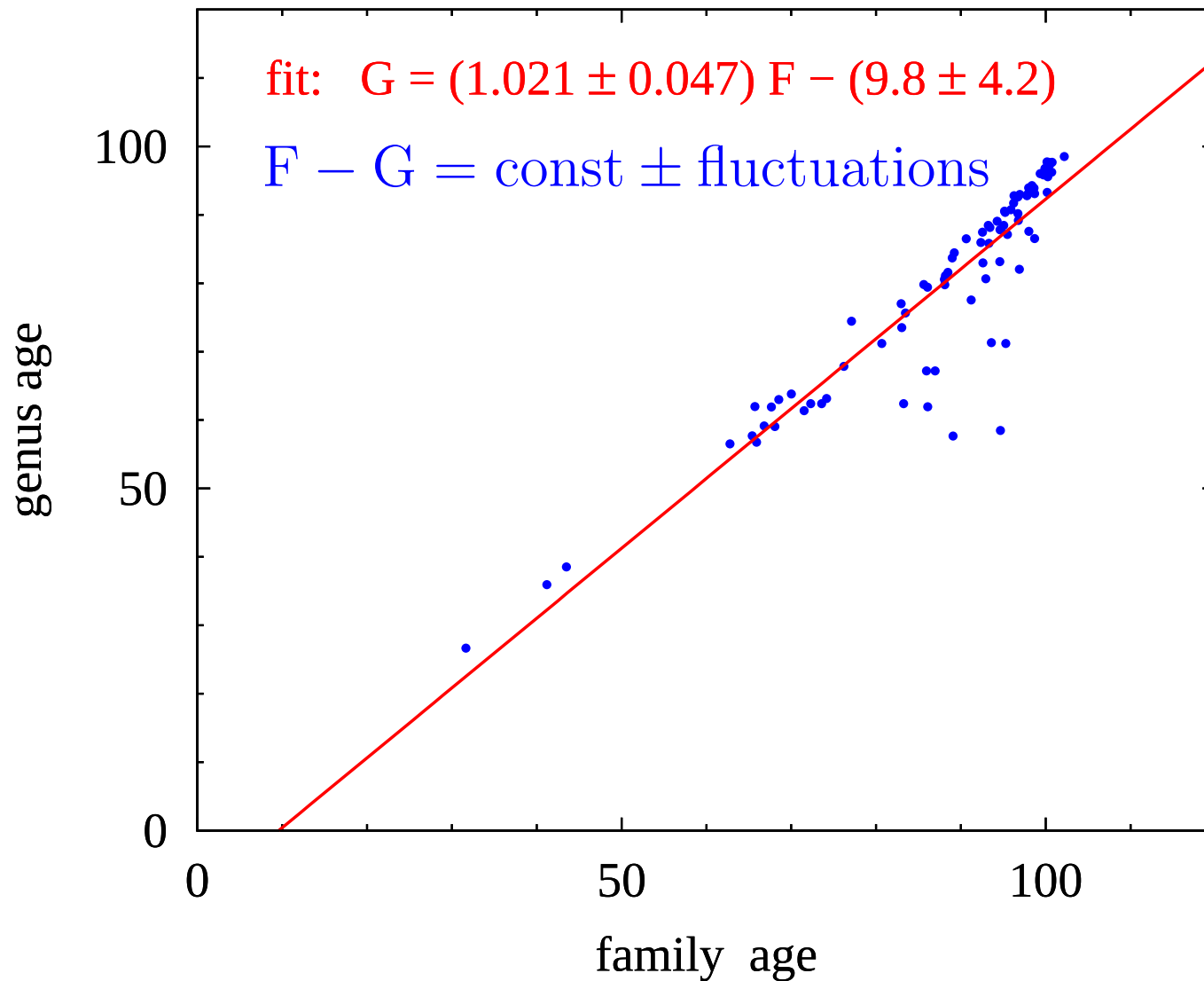


Dados reais para 89 famílias

Dados reais para 89 famílias



Dados reais para 89 famílias



Darwin, antropólogo

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Instintos também são sujeitos à seleção natural, e são passados via observação, imitação, instrução, educação, etc.

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Instintos também são sujeitos à seleção natural, e são passados via observação, imitação, instrução, educação, etc.
- A cooperação dá vantagens **diretas** a cada indivíduo, e também **indiretas** à população como um todo.

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Instintos também são sujeitos à seleção natural, e são passados via observação, imitação, instrução, educação, etc.
- A cooperação dá vantagens **diretas** a cada indivíduo, e também **indiretas** à população como um todo.
- O instinto da cooperação e do altruísmo se desenvolveu enormemente entre os humanos, e gerou o que denominamos civilização.

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Por ser muito mais rápida, a evolução baseada na cultura e não na genética é dominante entre os humanos, ao contrário dos outros seres vivos.

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Por ser muito mais rápida, a evolução baseada na cultura e não na genética é dominante entre os humanos, ao contrário dos outros seres vivos.
- A tribo que adquire uma grande fração de indivíduos cooperativos e altruistas adquire também vantagens comparativas com relação às outras tribos. Aí está a seleção natural no nível da cultura e do conhecimento, não entre indivíduos.

Darwin, antropólogo

Charles Darwin, *The Descent of Man* (1871)

- Por ser muito mais rápida, a evolução baseada na cultura e não na genética é dominante entre os humanos, ao contrário dos outros seres vivos.
- A tribo que adquire uma grande fração de indivíduos cooperativos e altruistas adquire também vantagens comparativas com relação às outras tribos. Aí está a seleção natural no nível da cultura e do conhecimento, não entre indivíduos.

Patrick Tort, *L'Effect Darwin*, Seuil (2008)