

**Maria das Vitórias Alexandre Serafim**

**Criticalidade Auto-Organizada na Emissão de Óxido  
Nitroso ( $N_2O$ ) do Solo**

RECIFE-PE - FEV/2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

## **CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA NA EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO ( $N_2O$ ) DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

**Área de Concentração: Modelagem e Métodos Computacionais**

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Duarte Neto

RECIFE-PE - FEV/2016.

Ficha catalográfica

S481c Serafim, Maria das Vitórias Alexandre  
Criticalidade auto-organizada na emissão de óxido nitroso  
(N<sub>2</sub>O) do solo / Maria das Vitórias Alexandre Serafim. – Recife,  
2016.  
54 f. : il.

Orientador: Paulo José Duarte Neto.  
Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de  
Estatística e Informática, Recife, 2016.  
Inclui referências, anexo(s) e apêndice(s).

1. Óxido nitroso 2. Criticalidade auto-organizada 3. Floresta  
tropical 4. Cana-de-Açúcar 5. Pastagens I. Duarte Neto, Paulo José,  
orientador II. Título

CDD 574.018

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA NA EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO ( $N_2O$ ) DO SOLO**

Maria das Vitórias Alexandre Serafim

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 29/02/2016 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

---

Prof. Dr. Paulo José Duarte Neto  
DEINFO-UFRPE

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Tatijana Stosic  
DEINFO-UFRPE

---

Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo  
DF-UFRPE

Dedico ao meu amado esposo Edilson, pela paciência infinita, por ter permanecido ao meu lado, me incentivando a percorrer este caminho, por compartilhar angústias e dúvidas estendendo sua mão amiga em momentos difíceis, e por nunca me deixar desistir. E em especial ao meu pequeno príncipe Thaiury, tesouro da minha vida e fruto do amor mais forte e verdadeiro.

## Agradecimentos

Inicio meus agradecimentos por DEUS, que todos os dias de minha vida me deu forças para nunca desistir, além de ter colocado pessoas tão especiais a meu lado, sem as quais certamente não teria dado conta.

A meus pais, Arlindo e Adinalva, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade e me acharam A MELHOR de todas, mesmo não sendo. Isso só me fortaleceu e me fez tentar, não em ser A MELHOR, mas a fazer o melhor de mim. Obrigada pelo amor incondicional!

Agradeço ao meu querido orientador Prof. Dr. Paulo José Duarte Neto, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, pela liberdade e confiança referente ao presente trabalho, além da indiscutível amizade e compreensão em momentos difíceis. Sem a sua paciência de ouvir minhas inquietações, certamente não teria conseguido ordenar as idéias que borbulhavam na minha cabeça. A ele, pela amizade e atenção, devo essa dissertação.

A minha querida amiga e orientadora de graduação, Profa. Dra. Divanilda Maia Esteves, por quem tenho uma imensa admiração e gratidão, por toda força e confiança em mim depositada, as quais foram fundamentais para chegar onde estou hoje.

A todos os professores e colegas do Departamento de Estatística da UEPB, pelo conhecimento transmitido e pela disposição no esclarecimento de dúvidas, em especial aos Professores, Dr. Gustavo Esteves, Dra. Ana Patrícia Basto, Dr. Tiago Almeida, Dr. Ricardo Olinda e Dr. João Gil de Luna.

Aos meus irmãos Aliandro, Dorinha e Nevinha pelo apoio prestado, pela compreensão e claro por estarem sempre a torcer por mim.

A todos os professores do mestrado que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Aos meu sogros Sebastião Cardoso da Silva e Rita Barros da Silva que sempre me apoiaram, me dando força, carinho e incentivo.

Gostaria de agradecer a CAPES, por dispor de recursos financeiros para viabilizar a execução deste trabalho.

*"Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, por que o mundo pertence a quem se atreve. E a vida é muito bela para ser insignificante."*

**Charles Chaplin**

## Resumo

O estudo relacionado ao comportamento da emissão dos gases de efeito estufa é de grande importância para se compreender o aquecimento global. Nas últimas décadas, investigações vem sendo realizadas visando conhecer a maneira como os principais gases se comportam na superfície terrestre, dentre eles grande destaque é dado ao óxido nitroso ( $N_2O$ ), devido a sua elevada capacidade de aquecimento e seu tempo de permanência na atmosfera. A emissão de  $N_2O$  do solo é altamente variável, com um longo alcance e esta característica dificulta o estudo desse gás, tornando um pouco difícil a inferência estatística desta medida. Diante disso, uma série de métodos empíricos têm sido cada vez mais utilizados na estimativa das emissões do óxido nitroso a partir de sistemas agrícolas e florestais. No entanto, esses métodos não parecem adequados para explicar a grande variabilidade observada nos valores de  $N_2O$  em termos de uma função de densidade, devido à forma conceitual desses modelos. Além disso, fenômenos com as mesmas características da emissão do óxido nitroso do solo foram melhor descritos como sistemas criticamente auto-organizados (SOC). Desta forma, foi direcionado à questão de se encontrar evidências de criticalidade auto-organizada nas emissões de  $N_2O$  em diferentes usos do solo e em diferentes cenários ambientais tais como mudança de temperatura. Para atender os objetivos desse trabalho foram abordados alguns resultados teóricos e práticos da ideia de SOC e avaliou-se o comportamento da emissão do óxido nitroso em um solo natural de floresta tropical, observando se o evento apresenta um padrão de comportamento SOC, quando o solo encontra-se em temperatura ambiente e quando o mesmo é aquecido, além de estudar também a presença de SOC na emissão do  $N_2O$  do solo em diferentes usos da terra como Pastagens e Cana-de-Açúcar, discutindo os principais resultados obtidos. Os dados utilizados neste estudo são referentes a fluxos de  $N_2O$ , estimados a partir de câmaras fechadas.

**Palavras-chave:** Óxido Nitroso, Criticalidade Auto-Organizada, Floresta Tropical, Cana-de-Açúcar e Pastagens



## Abstract

Studies related to greenhouse gas emission behavior are very important to understand the global warming. In the last decades, investigations have been carried out to know how the main gases behave in the earth's surface. Among them, great emphasis is given to nitrous oxide ( $N_2O$ ), because of its high heat capacity and its permanency time in the atmosphere. The emissions of  $N_2O$  from the soil are highly variable, with a long range and this characteristic difficult the study of this gas, becoming the statistical inference of this measure a hard task. Before that, a series of empirical methods have been more and more used in the estimating emissions of the nitrous oxide from agricultural and forestry system. However, these methods do not appear adequate to explain the great variability observed in the values of  $N_2O$  in terms of a probability density function, because of the conceptual form of these models. Besides, phenomena with the same characteristics of the nitrous oxide emissions of the soil were better described as critically self-organized system (SOC). So, it was directed to the question in order to find self-organized criticality evidence of  $N_2O$  in different uses of the soil and in different environmental setting such as temperature changes. To answer the objectives of this work were broached some theoretical and practical results of the SOC idea and it was evaluated the behavior of the nitrous oxide emission in a natural rainforest soil, observing if the emissions show a SOC behavior both in a natural soil and when the same is heated. Also, SOC presence in the  $N_2O$  emission of the soil in different lands uses, such as pasture and sugarcane, was investigated.

**Key words:** Nitrous Oxide, Self-Organized Criticality, Rainforest, Sugarcane and Pasture

# Lista de Figuras

- 1 (A) Sistema de coleta de fluxo de gases utilizando-se o método da câmara estática sem aquecimento do solo; (B) Sistema de coleta de fluxo de gases com aquecimento (MARTINS, 2011). . . . . p. 2
- 2 Relação entre o número de ocorrências  $N(s)$  e o tamanho das avalanches  $s$ . p. 13
- 3 Aspecto geral da distribuição de um sistema que apresenta lei de potência. p. 15
- 4 Pilha de Areia (CASTRO, 2002). . . . . p. 16
- 5 Aspecto geral da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical em temperatura ambiente (Dados originais do trabalho em estudo). . . . . p. 24
- 6 Histograma dos dados originais da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical: (a) Solo em temperatura ambiente (Controle), (b) Solo Aquecido. p. 25
- 7 Gráficos Log-Log dos dados originais (cinza) e acumulados (preto) da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical: (a) Solo em temperatura ambiente, (b) Solo Aquecido. . . . . p. 26
- 8 Histogramas dos dados originais da Emissão de  $N_2O$  do solo: (a) Floresta Tropical (Controle), (b) Cultura de Cana-de-Açúcar e (c) Pastagens. . . . . p. 29
- 9 Gráficos Log-Log dos dados originais (Cinza) e Acumulados (Preto) da Emissão de  $N_2O$  do solo: (a) Floresta Tropical (Controle), (b) Cultura de Cana-de-Açúcar e (c) Pastagens. . . . . p. 30

# Lista de Tabelas

1	Estatísticas descritivas para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Floresta Tropical sem sistema de aquecimento (Dados de Controle). . . . .	p. 23
2	Estatísticas descritivas para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Floresta Tropical Aquecido. . . . .	p. 23
3	Estatísticas descritivas para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Cana-de-Açúcar. . . . .	p. 23
4	Estatísticas descritivas para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Pastagens. . . . .	p. 23
5	Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson $S_U$ para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Floresta Tropical sem sistema de aquecimento (Dados de Controle). . . . .	p. 27
6	Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição Johnson $S_U$ para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Floresta Tropical com sistema de aquecimento (Dados de Solo Aquecido). . . . .	p. 27
7	Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson $S_U$ para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Floresta Tropical (Controle). . . . .	p. 31
8	Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson $S_U$ para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Cana-de-Açúcar. . . . .	p. 31
9	Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson $S_U$ para os dados da emissão de $N_2O$ do solo de Pastagens. . . . .	p. 31

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 1
<b>2</b>	<b>Criticalidade Auto-Organizada</b>	p. 9
2.1	Introdução . . . . .	p. 9
2.2	Definição de Criticalidade Auto-Organizada . . . . .	p. 11
2.2.1	Distribuição da Lei de Potência . . . . .	p. 14
2.2.2	Sistemas que apresentam Criticalidade Auto-Organizada . . . . .	p. 15
2.2.2.1	Modelo da Pilha de Areia . . . . .	p. 15
2.2.2.2	Outros Modelos . . . . .	p. 17
<b>3</b>	<b>Análise da Emissão de Óxido Nitroso (<math>N_2O</math>) em diferentes usos do solo</b>	p. 19
3.1	Introdução . . . . .	p. 19
3.2	Metodologia . . . . .	p. 20
3.2.1	Descrição dos Dados . . . . .	p. 20
3.2.2	Procedimento de Análise . . . . .	p. 21
3.3	Resultados e Discursão . . . . .	p. 23
3.3.1	Análise Descritiva . . . . .	p. 23
3.3.2	Análise da Criticalidade Auto-Organizada . . . . .	p. 24
3.3.2.1	Dados de Floresta Tropical (Controle e Aquecido) . . . . .	p. 25
3.3.2.2	Dados de Floresta Tropical, Cana-de-Açúcar e Pastagens . . . . .	p. 28
<b>4</b>	<b>Conclusão Geral</b>	p. 34
	<b>Referências</b>	p. 35

# 1 Introdução

Atualmente, cresce o interesse pelas discussões sobre o aquecimento global. Sabe-se que um dos seus causadores é o efeito estufa, que é um fenômeno natural de aquecimento da atmosfera responsável por manter a temperatura média do planeta em níveis adequados para a existência dos seres vivos. Esse fenômeno ocorre quando uma parte da radiação solar refletida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases denominados “gases do efeito estufa”. Como consequência disso, a radiação infravermelha refletida pela terra fica retida na baixa atmosfera, resultando no aquecimento do planeta (ESCOBAR, 2008). No entanto, a quantidade de gases poluentes que são emitidos a todo instante, vem se tornando cada vez mais intenso, aumentando a temperatura consideravelmente.

Os gases do efeito estufa (GEE) são substâncias gasosas que absorvem parte da radiação infra-vermelha emitida principalmente pela superfície terrestre, e dificultam seu escape para o espaço. Isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida (SOLOMON et al., 2007). Os gases de maior relevância no contexto do efeito estufa são dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) e óxido nitroso ( $N_2O$ ). Esses gases recebem tal denominação por apresentarem a propriedade de reter o calor, da mesma forma que os vidros de um carro fechado ou o revestimento de uma estufa para cultivo de plantas (FORSTER et al., 2007).

Os aumentos nas concentrações dos GEE na atmosfera, que em grande parte estão associados à queima de combustíveis fósseis, à mudança de uso do solo e as atividades agropecuárias, têm causado impacto no balanço de radiação do planeta, tendendo ao aquecimento da superfície da Terra (LIMA, 2002).

Convém ressaltar que os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de gases de efeito estufa (GEE), dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001). O inadequado manejo do solo origina vários processos degradativos. A degradação do solo por processos físicos, químicos e biológicos faz com que o solo seja uma fonte de GEE. A degradação biológica pode influenciar drasticamente o fluxo de  $CO_2$ ,  $N_2O$ , e  $CH_4$ .

A magnitude e o tipo de emissões de GEE a partir de processos de degradação do solo dependem do uso, sistemas de cultivo e manejo do solo. Além disso, o manejo do solo afeta a dinâmica do carbono  $C$  e as emissões gasosas influenciam nas propriedades do solo (LIMA, 2002).

O desenvolvimento de metodologias capazes de estimar os fluxos de GEE a partir dos solos tem despertado grande interesse em pesquisadores dessa área. Diferentes métodos podem ser utilizados para medir o fluxo de gases de efeito estufa emitidos para a atmosfera a partir do solo ou absorvidos pelo mesmo, dependendo do objetivo do estudo, do ecossistema utilizado, da disponibilidade de recursos, e do gás em questão. Os métodos mais comuns de avaliação desses fluxos demandam a utilização de câmaras (COSTA et al., 2006; DAVIDSON et al., 2002) que são colocadas sobre a superfície do solo e podem ser abertas (com fluxo contínuo) ou fechadas (modo dinâmico e modo estático) (BEKKU et al., 1997). As câmaras são as ferramentas mais úteis para medição dos fluxos de gases do solo por serem portáteis, de simples funcionamento e dependendo do método utilizado são de baixo custo (DALAL et al., 2003; DENMEAD, 2008). Quando utilizadas seguindo critérios recomendados são de grande valor e apresentam uma ótima relação custo-benefício (DENMEAD, 2008; HUTCHINSON e ROCHETTE, 2003).

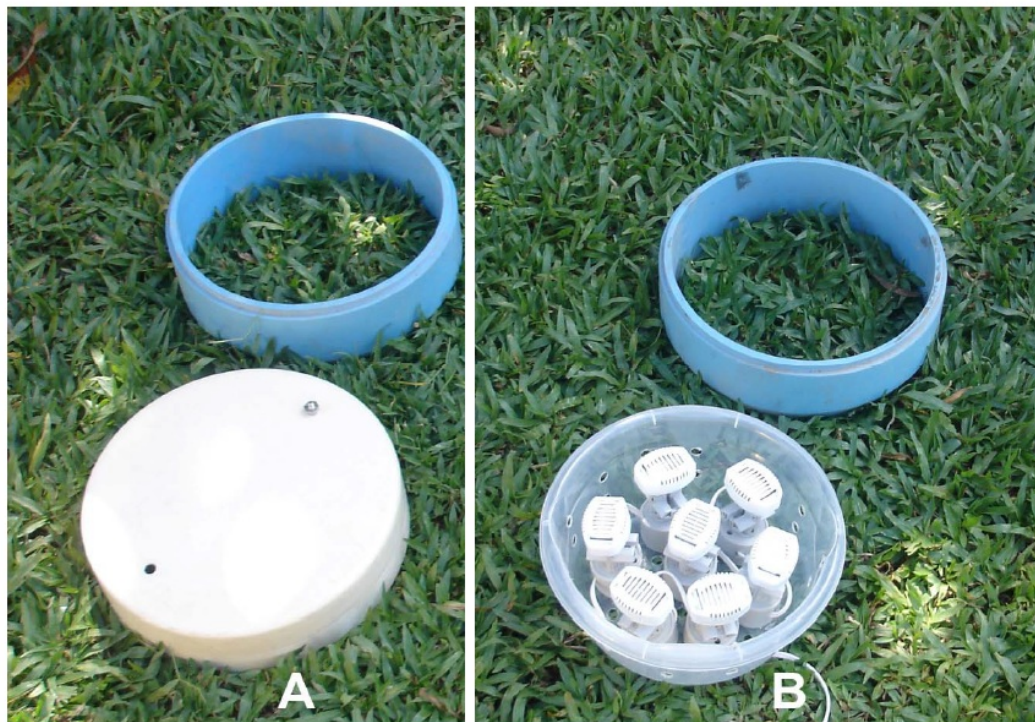


Figura 1: (A) Sistema de coleta de fluxo de gases utilizando-se o método da câmara estática sem aquecimento do solo; (B) Sistema de coleta de fluxo de gases com aquecimento (MARTINS, 2011).

As câmaras são colocadas sobre o solo, e medidas de concentração do gás no interior delas são utilizadas para o cálculo do fluxo. Nas câmaras estáticas fechadas, não há renovação do ar no interior da câmara, e o fluxo do gás é estimado a partir da concentração do gás medido em amostras que são retiradas do interior da câmara a intervalos fixos de tempo através do uso de seringas, visando acompanhar o incremento da concentração interna de gases (DALAL et al., 2003; DAVIDSON et al., 2002). Nas câmaras abertas, ou seja, com renovação do ar, é mantido um fluxo contínuo de ar através da câmara, e o fluxo do gás de interesse é estimado pela diferença de concentração deste gás entre a entrada e a saída da câmara (DENMEAD, 1993; MATTHIAS et al., 1980; MOSIER, 1989;).

Dentre os principais GEE, grande destaque pode ser dado ao  $N_2O$  devido a sua elevada capacidade de aquecimento e seu tempo de permanência na atmosfera que são determinados pela sua formação molecular (HOUGHTON et al., 2001). Atualmente, o óxido nitroso ( $N_2O$ ) tem recebido maior atenção, principalmente por contribuir para o efeito estufa e para a destruição da camada de ozônio (GIACOMINI et al., 2006). É a segunda forma nitrogenada mais abundante na atmosfera e possui um tempo de vida de cerca de 110 a 150 anos (BANGE et al., 1996). Na troposfera, absorve radiação infravermelha contribuindo com aproximadamente 6% do efeito estufa (BANGE et al., 1996; PATRA et al., 1999). Devido ao longo tempo de residência, alcança a estratosfera onde se torna a maior fonte de óxidos de nitrogênio através de reações de foto-oxidação, afetando também a camada de ozônio (CRUTZEN, 1980). Seu potencial de aquecimento global é de 310 vezes mais efetivo do que o  $CO_2$  em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2001).

Por esta razão, investigações a respeito da emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ) do solo geralmente tentam compreender a sua importância no aquecimento global, os processos químicos de produção de ozônio ( $O_3$ ), os aspectos econômicos e ambientais do nitrogênio ( $N$ ), da utilização de fertilizantes, as mudanças devido a diferentes usos do solo e para melhor compreensão do ciclo do nitrogênio e de ecossistemas (DAVIDSON et al., 2000).

As fontes de emissão de  $N_2O$  podem ser divididas em naturais e antrópicas. As fontes naturais de  $N_2O$  incluem os oceanos, o solo das florestas, savanas e campos, enquanto as fontes antropogênicas incluem os solos agrícolas, os dejetos de animais, fertilizantes nitrogenados, resíduos vegetais, a produção de nylon e de ácido nítrico, queima de resíduos e de combustíveis fósseis (FORSTER et al., 2007). Embora as principais fontes emissoras de  $N_2O$  para a atmosfera sejam através dos processos biológicos, a queima de biomassa vegetal e os catalisadores de veículos também contribuem muito para o aumento das concentrações desse gás (OLIVIER et al., 1998).

No entanto, os fluxos de óxido nitroso do solo para a atmosfera dependem da razão entre produção e consumo, e da difusão do gás no solo. A produção e emissão desse gás em solos de áreas nativas ou alteradas, são resultantes da atividade microbiológica de decomposição e mineralização da matéria orgânica. Os ciclos do carbono e nitrogênio são influenciados diretamente pelo processo de decomposição da matéria orgânica do solo, alterando a dinâmica desse elemento (BAGGS, 2006).

Contudo, as emissões de  $N_2O$  a partir de solos ocorrem como consequência das transformações do  $N$ , nos processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989). Esses processos são altamente dependentes da disponibilidade de oxigênio, umidade, temperatura do solo e do ar, e da disponibilidade de nitrogênio ( $N$ ). A nitrificação ocorre em condições aeróbicas, e a desnitrificação ocorre em condições inversas, ou seja, em condições de anaerobiose (JANTALIA et al., 2006). Os últimos autores citados ainda ressaltam que a desnitrificação é um processo dependente da disponibilidade de carbono ( $C$ ) no solo, logo, a presença de matéria orgânica também é importante para sua ocorrência. Apesar da produção de  $N_2O$  por ambos os processos, a grande maioria dos estudos tem evidenciado que o processo de desnitrificação é mais efetivo na produção desse gás (GOMES, 2006).

Além disso, fatores físicos, químicos e biológicos do solo interagem influenciando as emissões de  $N_2O$  (YAMAGUCHI et al., 1994). As propriedades responsáveis por controlar as emissões a partir de solos agrícolas têm sido identificadas como a temperatura, a umidade, os espaços de poros preenchidos por água e o pH, as quais afetam diretamente as atividades dos microrganismos nitrificadores e desnitrificadores (DALAL et al., 2003). Mas apesar dos solos com vegetação natural representarem grande parte das emissões de  $N_2O$  emitidas globalmente (DENMAN et al., 2007), os solos também podem ser um dreno deste gás. No entanto, o consumo de  $N_2O$  pelos solos é um processo ainda pouco conhecido.

As emissões de  $N_2O$  do solo são altamente variável, com um longo alcance (YANAI et al., 2003; LEMKE et al., 1998), em decorrência de alterações nos processos e fatores que orientam a dinâmica do  $C$  e do  $N$  no solo. A emissão desse gás varia, não apenas com as condições climáticas e as características do solo (e do seu manejo), mas também com a quantidade, o tipo e a qualidade dos resíduos adicionados ao solo. Esta grande variabilidade temporal e espacial nas taxas de emissão de  $N_2O$  do solo, deve-se principalmente a complexidade das interações entre as variáveis físicas, químicas e biológicas (MOSIER, 1983). Esta característica dificulta o estudo desse gás, tornando difícil a inferência estatística desta medida. Consequentemente, isto leva ao uso de testes não-paramétricos por



estes não requererem distribuição Normal dos dados, mas isto acaba limitando os tipos de inferências a serem feitas.

Diante disso, uma série de métodos empíricos têm sido cada vez mais utilizados na estimativa das emissões do óxido nitroso a partir de sistemas agrícolas e florestais. Tais métodos são ferramentas essenciais que permitem investigar o comportamento das emissões do óxido nitroso e seus efeitos sobre os ecossistemas terrestres, integrando os diferentes processos envolvidos na complexa dinâmica das emissões do referido gás. Com isso, alguns modelos conceituais como o “hole-in-the pipe” (HIP) (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989) e o modelo de Desnitrificação e Decomposição - DNDC (LI et al., 1992), são usados para descrever o comportamento do fluxo do  $N_2O$ .

Nos solos, a produção e emissão de  $N_2O$  e  $NO$  são reguladas principalmente pelos mesmos processos microbiológicos e ecológicos. Eles foram resumidos em um modelo conceitual que envolve as muitas variáveis do solo, com diferentes níveis de regulação, conhecido como “hole-in-the-pipe” (HIP) (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989; DAVIDSON et al., 2000). De acordo com esse modelo, as emissões totais de  $N_2O$  e  $NO$  são proporcionais ao nitrogênio inorgânico que fluem pelos tubos (pipes) da nitrificação e desnitrificação. Os gases vazam pelos orifícios que são regulados pelas condições do solo, tais como umidade e concentrações de oxigênio.

Por outro lado, o modelo DNDC (desnitrificação e decomposição) (LI et al., 1992), baseia-se na simulação dos processos biogeoquímicos do carbono e nitrogênio em diferentes agro-ecossistemas. Trata-se de um simulador computacional composto por seis sub-modelos, que simulam o clima do solo, crescimento das plantas, decomposição, nitrificação, desnitrificação e fermentação. Ele foi desenvolvido para possibilitar a estimativa de fluxos de gases de efeito estufa gerados pelos principais ecossistemas mundiais. Desse modo, o DNDC viabilizaria a compreensão do processo de emissão desses gases em diferentes cenários permitindo, a partir deles, identificar os seus pontos críticos.

No entanto, os modelos “hole-in-the pipe” (HIP) (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989) e o modelo de Desnitrificação e Decomposição - DNDC (LI et al., 1992) não parecem adequados para explicar a grande variabilidade observada nos valores de  $N_2O$  em termos de uma função de densidade de probabilidade, devido à forma conceitual desses modelos.

Moulin et al. (2011), observaram melhores ajustes de dados de  $N_2O$  para distribuição Johnson  $S_U$  e distribuição de probabilidade Log- Generalizada, além disso, recomendaram o modelo Log-Normal como mais uma alternativa para descrever a emissão do referido gás. Segundo os autores, os dados de emissão de  $N_2O$  foram melhor descritos pela distribuição

de Johnson  $S_U$  devido sua função densidade de probabilidade ser ilimitada em ambas as caudas e suportar uma ampla gama de assimetria e curtose. Dessa forma, melhoraria a precisão das estimativas dos fluxos de  $N_2O$ .

O sistema Johnson abrange três principais distribuições que podem modelar uma ampla variedade de fenômenos. Johnson (1949), desenvolveu um sistema flexível de distribuição, com base em três famílias de transformações, que traduzem uma variável observada não-normal para outra em conformidade com o padrão da distribuição normal. Ele introduziu três transformações monotônicas de uma variável  $X$  para uma variável  $Z$  normal padrão, que corresponde a três distribuições Johnson.

Segundo Johnson (1949), uma variável aleatória  $X$  é dita seguir uma distribuição Johnson se existe uma função monótona  $g$  tal que:

$$Z = \gamma + \delta g \left( \frac{X - \xi}{\lambda} \right); \quad \delta > 0, \quad \lambda > 0 \quad (1.1)$$

onde  $Z$  é uma variável aleatória normal padrão, e  $\gamma, \delta$  são parâmetros de forma,  $\lambda$  é um parâmetro de escala,  $\epsilon$  é um parâmetro de localização e  $g(\cdot)$  é uma das seguintes funções:

$$g(y) = \begin{cases} \log(y), & S_L \text{ distribuição} \\ \log(y + \sqrt{y^2 + 1}), & S_U \text{ distribuição} \\ \log\left(\frac{y}{1-y}\right), & S_B \text{ distribuição} \end{cases} \quad (1.2)$$

Em que cada uma das função em (1.2) define uma família de distribuição Johnson. E  $y = \left(\frac{X-\xi}{\lambda}\right)$ .

- Unbounded ( $S_U$ ): o conjunto de distribuições que vão ao infinito, tanto na cauda superior quanto inferior;
- Bounded ( $S_B$ ): o conjunto de distribuição que têm um limite fixo de cada aba superior ou inferior, ou ambos;
- Log normal ( $S_L$ ): uma fronteira entre as formas de distribuição ( $S_U$ ) e ( $S_B$ ).

A flexibilidade proporcionada pela escolha da forma e ajuste dos parâmetros permite uma grande agilidade no ajuste da curva aos dados. Após estimar os parâmetros, o cálculo das probabilidade dos quantis é simples, porque essas distribuições vem de uma simples transformação de uma distribuição normal (JOHNSON, 1949). A distribuição Johnson  $S_U$  considerada neste trabalho é a mais interessante, uma vez que é leptocúrtica (distribuição com caudas pesadas) e seu suporte é o conjunto dos números reais. Além disso, oferece um número de parâmetros que caracterizam uma ampla classe de assimetrias e curtose e pode modelar um grande número de fenômenos.

Segundo Johnson (1949), a função densidade de probabilidade  $f(x)$  da variável aleatória  $X$  que segue uma distribuição Johnson  $S_U$ , é facilmente deduzida da distribuição normal por transformações canônicas e é dada por:

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}\sqrt{(y^2 + 1)}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \gamma + \delta \log [y + \sqrt{(y^2 + 1)}] \right\}^2 \right] \quad (1.3)$$

Com,  $-\infty < y < \infty$ ,  $\delta > 0$  e  $\lambda > 0$ .  $\xi$  é um parâmetro de localização,  $\gamma$  e  $\delta$  são parâmetros de forma e  $\lambda$  é um parâmetro de escala. Onde,  $-\infty < \gamma < \infty$  e  $-\infty < \xi < \infty$ .

Apesar de Moulin et al. (2011), terem observado melhores ajustes da emissão de  $N_2O$  do solo através da função de distribuição Johnson  $S_U$ , esse fenômeno apresenta algumas características de sistemas que são descritos pelo modelo SOC, como por exemplo, valores extremos de baixa frequência. Segundo Bak et al. (1987), a Criticalidade Auto-Organizada do inglês Self-Organized Criticality (SOC), é um fenômeno que aparece em sistemas que evoluem naturalmente para um estado crítico sem qualquer sensibilidade à ajustes de parâmetros ou disposições da configuração inicial. Neste estado crítico, o sistema é altamente susceptível a pequenas mudanças ou ruídos, que podem provocar reações totalmente imprevisíveis.

Diante deste cenário, a teoria da Criticalidade Auto-Organizada tem despertado um grande interesse da comunidade científica nos últimos anos. Padrões de comportamento SOC foram encontrados em uma infinidade de campos, variando de terremotos (HAINZL et al., 1999) para guerras (ROBERTS e TURCOTTE, 1999) passando pela economia (SCHEINKMAN e WOODFORD, 1994) e incêndios florestais (DROSSEL e SCHWABLE, 1992). Convém ressaltar, que sistemas que apresentam SOC são caracterizados por distribuições de Lei de Potência, e mesmo, os eventos de grande magnitude sendo extremamente raros, eles acontecem em todas as escalas (BAK, 1996).

Desta forma, foi avaliado se a emissão de  $N_2O$  do solo pode ser considerado um sistema criticamente auto-organizado em diferentes usos do solo e em diferentes cenários ambientais tais como mudança de temperatura do solo.

Para atender os objetivos desse trabalho, a presente dissertação está estruturada da seguinte maneira: No Capítulo 2, é apresentado o conceito de Criticalidade Auto-Organizada, seus fundamentos e regras, além da maneira pela qual se pode identificar tais sistemas. Serão usados como exemplo o modelo da pilha de areia, entre outros exemplos onde o fenômeno é observado, para uma melhor compreensão da importância da criticalidade auto-organizada. No Capítulo 3, avalia-se o comportamento da emissão do  $N_2O$  em um solo natural de floresta tropical, observando se o evento em estudo apresenta um padrão SOC, quando o solo é mantido em temperatura ambiente e quando o mesmo é aquecido. Além disso, analisa-se a presença de um padrão SOC na emissão do  $N_2O$  do solo em diferentes usos da terra, discutindo os principais resultados obtidos. Os dados estudados no capítulos 3 foram fornecidos pelo Prof. Dr. Luiz Antônio Martinelli do Centro de Energia Nuclear na Agricultura do Campus da Esalq em Piracicaba, SP. Eles são referentes a fluxos de  $N_2O$ , estimados a partir de câmaras fechadas distribuídas em solo de floresta tropical, cultura de cana-de-açúcar e pastagem, em São Paulo, Brasil.

## 2 Criticalidade Auto-Organizada

### 2.1 Introdução

Existem diversos fenômenos na natureza, onde sistemas formados por vários elementos idênticos e interagindo entre si de forma simples geram um comportamento coletivo e bastante complexo. O comportamento global do sistema não reproduz o comportamento individual de cada uma das partes que o formam e nem pode ser previsto ou entendido a partir das regras de interação entre os elementos. Sistemas com estas características são denominados de sistemas complexos. Geralmente cada um com uma dinâmica não-linear, apresentando comportamentos caóticos (AUYANG, 1998; SPORNS, 2007).

Bak (1996), define um sistema que apresenta grande variabilidade como complexo. A variabilidade pode existir em diferentes níveis de escala, com novos detalhes aparecendo em cada etapa. Foley (2003), complementa a visão de Bak, adicionando algumas características em comum de tais sistemas: os seus componentes podem se configurar por meio de um número astronomicamente grande de formas (eles são complexos); experimentam mudanças constantes em resposta a estímulos ambientais e aos seus próprios processos de desenvolvimento (eles são adaptáveis); tendem a atingir configurações padronizadas estáveis e reconhecíveis (são auto-organizados); e operam longe dos estados estáveis, mantendo processos de auto-organização (são sistemas operando fora do equilíbrio).

Além disso, os sistemas complexos se manifestam na natureza refletindo a tendência de grandes sistemas com muitos componentes se relacionando num estado chamado de crítico, fora do equilíbrio, onde poucas variações podem conduzir a eventos conhecidos como avalanches, que são perturbações de todos os tamanhos. Este estado é estabelecido devido às dinâmicas de interações entre os agentes do sistema, assim o estado crítico é auto-organizado. Segundo Bak (1996), a criticalidade auto-organizada é o único mecanismo conhecido que gera a complexidade. Como o próprio nome sugere, essa teoria sustenta que sistemas complexos tendem a se auto-organizarem em um estado crítico.

Por sua vez, um sistema é considerado auto-organizado quando sua estrutura se modifica sem a influência de nenhum agente externo, ou seja, a organização do sistema resulta apenas das interações internas entre os seus constituintes (HAKEN, 2008). O sistema muda sua estrutura interna para se adaptar às mudanças no meio ambiente sem controle externo explícito (SERUGENDO et al., 2005). Por isso, sistemas auto-organizados geralmente exibem o que parece ser ordem espontânea (NICOLIS e PRIGOGINE, 1977), devido ao fato que a ordem apresentada pelo sistema não estar relacionada às características específicas de um ou mais dos seus componentes, mas sim às relações que estes mantêm entre si.

Em outras palavras, a auto-organização de um sistema também pode ser definida como sendo um processo dinâmico e adaptável, em que cada componente do sistema adquire e mantém as informações sobre seu ambiente e vizinhos, sem controle externo e onde o comportamento do sistema pode evoluir ou mudar ao longo do tempo. A auto-organização muitas vezes resulta em comportamento emergente que pode ser desejável ou indesejável (SERUGENDO et al., 2005).

De acordo com Serugendo et al. (2005), o comportamento de sistemas auto-organizados é caracterizado pelas seguintes propriedades: Emergência, Adaptação e Evolução.

- **Emergência:** Fenômeno em que o comportamento global do sistema surge a partir das interações entre os componentes locais. Os fenômenos emergentes surgem de interações locais que ocorrem entre os componentes individuais, permitindo que o sistema opere sem qualquer controle central. Neste caso, não há nenhum controle central interno ou fluxo de informação centralizada. Como resultado, o acesso à informação global é limitada pela localidade de interações.
- **Adaptação:** Um sistema adaptativo é aquele que se modificará em diferentes estados do sistema, a fim de ter sucesso dentro de diferentes ambientes. A capacidade de re-organização de sistemas auto-organizados implica na adaptação às variações ambientais externas. Mesmo diante da presença de perturbações os sistemas auto-organizados mudam de forma autônoma para manter a sua organização.
- **Evolução:** A evolução é uma consequência da emergência e da adaptação em sistemas de auto-organização. Peças ou componentes constituintes e comportamentos podem aparecer e desaparecer quando necessário. Esta instabilidade é caracteri-

zada principalmente por uma dinâmica não-linear que apresenta pequenas flutuações nas condições ambientais resultando em variações significativas no comportamento geral do sistema. Além disso, tais sistemas exibem aumento de sensibilidade às condições iniciais produzindo diferentes padrões de comportamento. Portanto, as propriedades gerais do sistema não pode ser entendida simplesmente examinando o comportamento dos componentes individuais separadamente.

Dessa forma, a auto-organização e a complexidade procuram entender a origem e o caráter das estruturas espaciais e dinâmicas temporais em sistemas de muitos componentes que exibem, sem forçamento externo, grande diversidade, ou variabilidade.

## **2.2 Definição de Criticalidade Auto-Organizada**

A teoria da criticalidade auto-organizada (SOC, do inglês Self-Organized Criticality) foi proposta inicialmente por Bak, Tang e Wiesenfeld (1987), para descrever a tendência natural que alguns sistemas têm em evoluírem para um estado crítico sem a dependência de ajustes externos nos parâmetros e sem configuração inicial do sistema. Ela procura explicar o funcionamento da natureza como um sistema auto-organizado, e é uma das mais citadas no meio científico nas últimas décadas. Esta teoria trata de um tema afim ao das catástrofes, abordando em especial o momento crítico de transformação de um sistema que o leva à condição de criticalidade: o ponto de inflexão entre a desorganização e a auto-organização, entre o caos e a nova ordem.

Bak et al. (1987), formula sua teoria como uma teoria geral da auto-organização, incorporando conceitos provenientes da teoria do caos, da termodinâmica do não equilíbrio, das catástrofes e dos fractais, e buscando aplicabilidade nos mais diversos campos, como a cosmologia, a geografia, a biologia, a neurociência e a economia, ilustrando sua teoria com exemplos na natureza e na sociedade.

Além disso, a amplificação de pequenas alterações internas seria capaz de levar determinado sistema à condição crítica e causar uma reação em cadeia geradora de uma mudança de comportamento. Em sistemas que exibem comportamento crítico, não existe uma única resposta característica para a distribuição espacial e/ou temporal do sistema, mas sim uma invariância de escala. Outras características importantes do estado crítico auto-organizado são: a existência de um longo período transiente, as correlações espacial e temporal exibem lei de potência e há grandes instabilidades denominadas avalanches (BAK, 1996).

Por isso, o conceito do SOC foi proposto como uma tentativa de explicar de maneira única a ocorrência de invariância de escala na natureza. Essa invariância de escala é a propriedade em que um determinado sistema exhibe as mesmas características independentemente da escala de observação. Ela é normalmente caracterizada espacialmente por distribuições fractais, que tem, em geral, uma forma auto-similar, observável em qualquer escala (BAK et al., 1987).

Por sua vez, no estado crítico, os sistemas criticamente auto-organizados apresentam clusters, que são regiões dentro das quais pequenas perturbações locais podem se propagar. Estes clusters acontecem de todos os tamanhos, o que significa que perturbações locais se propagam em todas as escalas de tamanho, fazendo com que os tempos de vida destas perturbações também flutuem em todas as escalas de tempo. Os sistemas interativos evoluem de modo natural para esse ponto crítico, onde as flutuações temporais se comportam de acordo com funções do tipo lei de potência, que descrevem apropriadamente sistemas sem escala preferencial, revelando a ausência de um “tamanho” esperado para a ocorrência do próximo evento (BAK, 1996). Por isso, a evolução do sistema só pode ser submetida a tratamento estatístico, ficando restrita ao campo das probabilidades.

As Leis de Potência, que tem como principal propriedade a invariância à escala, ocorrem em muitas situações de interesse científico e tem consequências significativas para a compreensão dos fenômenos naturais e artificiais. Mas infelizmente, a identificação e caracterização dessas leis é complicada pelas grandes variações que ocorrem na cauda de sua distribuição, além disso, a região que representa a distribuição de grandes eventos é rara, e existe a dificuldade em identificar o intervalo ao longo do qual o comportamento de lei de potência se mantém. Estas distribuições indicam que pequenas ocorrências são muito comuns e grandes ocorrências são raras (CLAUSET et al., 2007). Por isso, elas são utilizadas para descrever eventos nos quais uma variável aleatória apresenta valores altos com pouca frequência, enquanto os valores mais baixos aparecem com muita frequência.

Além disso, em um sistema que apresenta SOC, as pequenas perturbações podem conduzir as chamadas-avalanches, isto é, os eventos que são espacialmente ou temporalmente, distribuídos através do sistema. Isto acontece independentemente do estado inicial. Em que, a mesma perturbação pode levar a avalanches pequenas ou grandes, que no final irá revelar uma distribuição que segue uma lei de potência entre o tamanho dos eventos e sua abundância (BAK, 1996):



$$N(s) \sim s^{-\tau} \quad (2.1)$$

onde  $N(s)$  é o número de avalanches de um dado tamanho,  $s$  é o tamanho dos eventos e  $\tau$  é uma constante real positiva da lei de potência. Se representarmos a equação (2.1) numa escala logarítmica, temos:

$$\log N(s) = -\tau \log s \quad (2.2)$$

A relação entre o logaritmo do número de avalanches de um determinado tamanho  $N(s)$  e o logaritmo do tamanho dessas avalanches  $s$ , decresce de forma linear. Em que o expoente  $\tau$  é a inclinação da reta no gráfico  $\log \times \log$  (Figura 2). A característica de invariância de escala dos sistemas complexos pode ser visualizada pelo fato de que uma linha reta é a mesma em cada ponto, onde nenhum ponto se destaca.

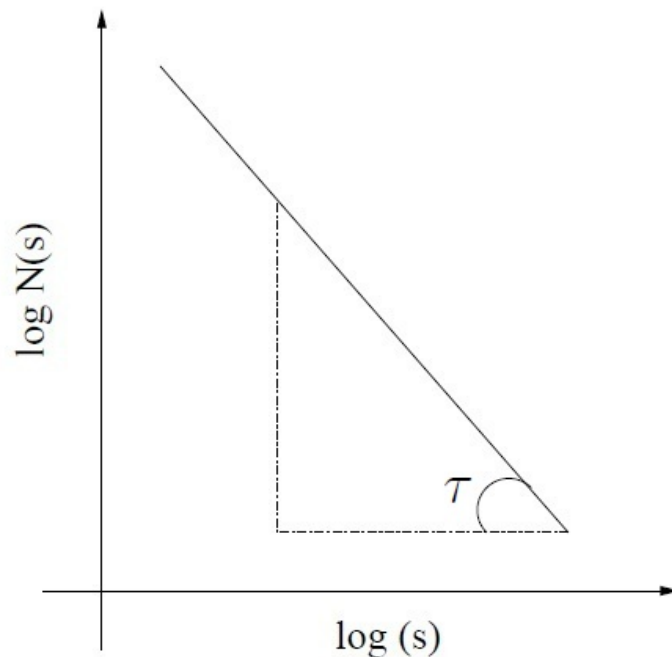


Figura 2: Relação entre o número de ocorrências  $N(s)$  e o tamanho das avalanches  $s$ .

### 2.2.1 Distribuição da Lei de Potência

Diversas distribuições tanto de fenômenos naturais quanto artificiais são compostos por um grande número de fenômenos comuns e um pequeno número de fenômenos raros. Estes fenômenos apresentam regularidade nas quais o tamanho de  $N(x)$  de um evento pode ser associado a alguma propriedade  $x$  do evento através de uma simples escala.

Diante disso, as leis de potência podem ser utilizadas para representar a probabilidade de ocorrências de eventos de grande porte, pois a principal propriedade dessas leis que as tornam interessantes é a sua invariância à escala. Estes eventos de grande porte estão na cauda superior da distribuição e são eventos raros.

Contudo, a estimativa da lei de potência da função densidade de probabilidade  $n(x) \sim x^{-\tau}$  para dados reais, apresenta grandes dificuldades devido a alta dispersão dos dados. É uma prática comum examinar o possível comportamento de lei de potência observando a função de distribuição acumulada  $N(x)$  (ANDRADE et al., 1998):

$$N(x) = N(X > x) = \int_x^M n(x) dx \quad (2.3)$$

onde  $M$  é o evento máximo nos dados. Se  $M \rightarrow \infty$  e se  $\tau > 1$ , então  $N(x) \sim x^{-\tau+1}$ , e assim, não é possível substituir  $M$  por  $\infty$  na equação (2.3). Logo, obtem-se:

$$N(x) := \frac{N(x)}{x} \sim \frac{1}{x^\tau} \left[ 1 - \left( \frac{x}{M} \right)^{\tau-1} \right] \quad (2.4)$$

Assim, o gráfico  $\log [N(x)] \times \log (x)$  se afasta da linha reta quando  $x$  se aproxima de  $M$ .

De acordo com a figura 3, os eventos que estão na cauda superior da distribuição são eventos raros. Diante disso, espera-se um pequeno número de eventos de grande magnitude e um grande número de eventos de pequena magnitude, em fenômenos relacionados a sistemas que apresentam criticalidade auto-organizada. Isto significa que grandes eventos podem aparecer no sistema de vez em quando e reconfigurá-lo.

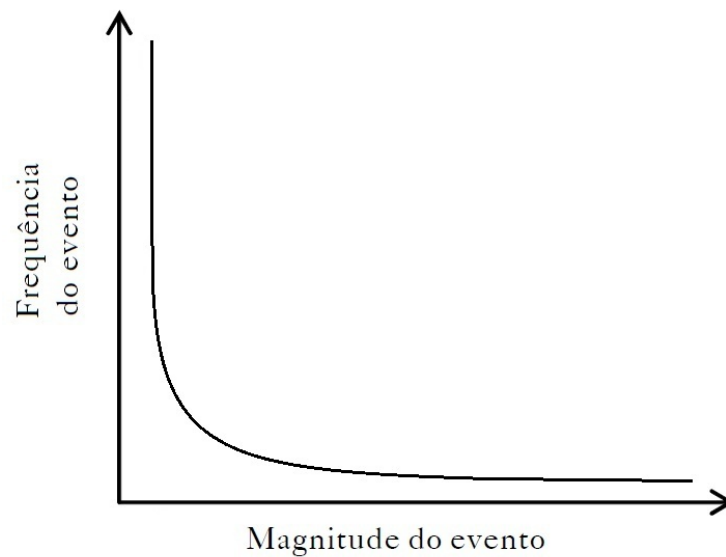


Figura 3: Aspecto geral da distribuição de um sistema que apresenta lei de potência.

## 2.2.2 Sistemas que apresentam Criticalidade Auto-Organizada

### 2.2.2.1 Modelo da Pilha de Areia

Segundo Bak et al. (1987), sistemas que são criticamente organizados evoluem para estados complexos sem a interferência de agentes de fora do sistema. Um exemplo muito interessante de criticalidade auto-organizada é modelo da pilha da areia, o mesmo apresenta comportamento de equilíbrio pontual, onde períodos de tranquilidade são interrompidos por deslizamentos de areia. Estes deslizamentos são causados pelo efeito dominó de um grão a outro, dessa forma, todos os grãos se relacionam individualmente uns com os outros.

Além disso, o objetivo desse modelo era captar as pequenas variações no sistema como um todo, obedecendo a regras simples e locais, podendo se organizar em um estado estacionário, que evolui em termos de explosões intensas e não através de um caminho com pequenas variações suave. O modelo exibe um comportamento de estado crítico, onde períodos de tranquilidade são interrompidos por períodos de grandes avalanches (BAK et al. 1987).

Diante disso, pode-se dizer que o modelo da pilha de areia consiste em um experimento em que grãos de areia são depositados continuamente sobre uma mesa (Figura 4). No início a pilha é plana, e os grãos individualmente estão relativamente perto de onde foram depositados. A pilha de areia na mesa se torna, em certos momentos, tão alta quanto possível para sua base, ela começa a ficar íngreme e haverá um ou alguns deslizamentos de areia, mas de forma mais local, sem afetar os demais, de modo que a areia escorrega pela encosta, aumentando a base e permitindo assim que a pilha continue crescendo (CASTRO, 2002).

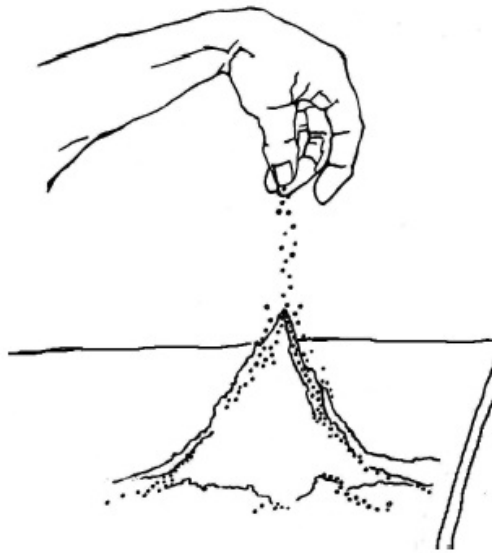


Figura 4: Pilha de Areia (CASTRO, 2002).

Dessa forma, os deslizamentos de areia se tornarão maiores com o passar do tempo, pois a inclinação da pilha atingirá um ponto onde não pode ser mais ultrapassada. Este ponto é o estado estacionário, onde a inclinação e a quantidade média de areia são constantes no tempo. Este estado só existe, se houver comunicação entre todo o sistema. Pode acontecer alguns deslizamentos que irá envolver todos ou a maior parte da pilha. E com isso, o sistema atingirá o seu estado crítico auto-organizado, onde suas dinâmicas passam a ser globais, quando várias pilhas estão próximas do seu limite (BAK, 1996).

### 2.2.2.2 Outros Modelos

Desde a descoberta da teoria da criticalidade auto-organizada (SOC), vários modelos foram propostos com o objetivo de explicar fenômenos complexos cujas origens são difíceis de determinar. Dentre os fenômenos estudados, encontrou-se a Criticalidade Auto-Organizada no sistema econômico em que analisou-se a interação entre produtores, fornecedores de insumos e clientes de maneira complexa (BAK et al., 1993). Outros trabalhos sugerem que a criticalidade auto-organizada pode ser a teoria que explica alguns fenômenos observados no cérebro (PRIESEMAN et al., 2009; VERTES et al., 2011).

Além disso, a dinâmica dos terremotos também é estudada há muitos anos, como sendo consequência da criticalidade auto-organizada da crosta terrestre. Consiste em estudar o acúmulo de tensão por atrito entre as placas tectônicas e a relaxação através de terremotos, pois os terremotos surgem devido a deslizamentos da crosta terrestre ao longo de falhas geológicas. Dessa forma, os terremotos de grande magnitude são imprevisíveis, já que o mecanismo que gera um pequeno terremoto é o mesmo que gera um grande terremoto (BAK et al., 1989).

Song et al. (2001), estudaram uma grande quantidade de incêndios florestais na China e mostraram que a criticalidade auto-organizada caracterizada por uma lei de potência explica muito bem o comportamento do fenômeno estudado. De acordo com os autores, os incêndios florestais apresentam as mesmas características de sistemas SOC, e probabilidade  $N(s)$  para uma floresta com  $s$  árvores pegar fogo é:

$$N(s) \equiv sN(s) \sim s^{-(\tau-1)} \quad (2.5)$$

Andrade et al. (1998), investigaram a existência de um comportamento SOC em dados de séries de precipitação pluvial que possuíam correlações de longo alcance. Os autores estudaram as secas, a duração da chuva e a intensidade da chuva como sendo fenômenos associados a precipitação. De acordo com eles, estes três eventos podem ser estudados do ponto de vista da teoria da criticalidade auto-organizada, em que uma certa quantidade  $x$  (intensidade da chuva ou duração de eventos de seca) pode ser escrito da seguinte maneira:

$$n(x) \sim x^{-\tau} \quad (2.6)$$

em que  $\tau$  é a inclinação de uma reta em um gráfico log-log. Segundo Andrade et al. (1998), a maneira mais conveniente de analisar  $n(x)$  é através do uso da distribuição empírica de probabilidade, dada por:

$$N(x) := \frac{N(x)}{x} \sim \frac{1}{x^\tau} \left[ 1 - \left( \frac{x}{M} \right)^{\tau-1} \right] \quad (2.7)$$

onde  $M$  é o evento máximo nos dados.

# 3 Análise da Emissão de Óxido Nitroso ( $N_2O$ ) em diferentes usos do solo

## 3.1 Introdução

Nos últimos anos, a atividade humana tem provocado uma série de alterações nos biomas naturais, causando um grande aumento nas emissões dos GEEs. A floresta tropical é um dos ambientes naturais mais produtivos e de maior diversidade do nosso planeta, sendo sua composição e estrutura determinadas, principalmente, pelo clima, solo, estado sucessional da vegetação e história natural de cada região (JORDAN e HERRERA, 1981). Seu solo tem significativa participação na dinâmica de processos químicos e físicos da atmosfera, uma vez que atuam como fonte ou sumidouro de vários gases de efeito estufa (KELLER et al., 1983).

Além de sua importância em relação a elevada riqueza de espécies, atualmente, as florestas tropicais desempenham um importante papel no ciclo global do carbono ( $C$ ), estocando e regulando grandes quantidades desse elemento entre a atmosfera e os sistemas terrestres, e no ciclo do nitrogênio ( $N$ ), devido ao aumento da deposição atmosférica deste nutriente (BROWN et al., 1995). Por sua vez, nos ecossistemas terrestres, o ciclo do nitrogênio ( $N$ ) está intimamente relacionado ao ciclo do  $C$  e é determinante nos fatores que regulam sua reciclagem entre a vegetação e o solo (NEFF et al., 2002).

Além disso, as florestas tropicais apresentam uma maior circulação de nitrogênio principalmente quando comparadas às florestas temperadas, e nelas uma grande quantidade de  $N$  circula anualmente (MARTINELLI et al. 1999), sendo as taxas de mineralização, emissões de gases e as perdas por lixiviação geralmente altas (VITOUSEK e SANFORD, 1986).

Por outro lado, em ecossistemas naturais, a nitrificação depende da ciclagem de  $N$  dentro do sistema solo-planta, que é maior em ecossistemas tropicais. Consequentemente, as emissões de  $N_2O$  são maiores em florestas tropicais do que em florestas temperadas (MARTINELLI et al., 1999), pois os solos tropicais são considerados grandes emissores naturais de  $N_2O$  para a atmosfera (SOUSA NETO, 2008).

Acredita-se que o setor da agropecuária, principalmente a agricultura, tem um papel muito importante no aumento dos gases de efeito estufa (JOHNSON et al., 2005). Pois, o manejo agrícola modifica os estoques e as taxas de nitrogênio ( $N$ ) no solo, alterando as perdas desse elemento para a atmosfera, especialmente na forma de óxido nitroso ( $N_2O$ ). Para que estas perdas possam ser reduzidas, é importante conhecer os processos e fatores ambientais que regulam as emissões provenientes das diversas áreas de produção. Nos solos agrícolas, a nitrificação e a desnitrificação são os principais processos microbianos responsáveis pela produção de  $N_2O$  (SIGNOR e CERRI, 2013).

Contudo, as emissões mais elevadas de  $N_2O$  decorrentes dos processos de nitrificação e desnitrificação, são encontradas a partir de solos tropicais. A conversão das áreas de florestas tropicais em agricultura e pastagem resultam em grandes emissões desse gás, e seu fluxo aumenta ainda mais quando as terras agrícolas e florestais são fertilizadas ou adubadas (SCHLESINGER, 1997). Além disso, as emissões de  $N_2O$  dos solos agrícolas causam grande preocupação, pois implica em uma redução na disponibilidade de  $N$  para as culturas, e ao mesmo tempo contribui com o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio (CRUTZEN, 1981).

No presente capítulo, será estudado se o comportamento da emissão de  $N_2O$  em um solo natural de floresta tropical apresenta um padrão SOC, quando o solo é mantido em temperatura ambiente e quando o mesmo é aquecido. Além disso, será analisado se o modelo SOC se ajusta adequadamente em diferentes usos do solo, tais como, floresta tropical, cana-de-açúcar e pastagens.

## **3.2 Metodologia**

### **3.2.1 Descrição dos Dados**

Os dados utilizados no presente trabalho foram fornecidos pelo Prof. Dr. Luiz Antônio Martinelli do Centro de Energia Nuclear na Agricultura do Campus da Esalq em Piracicaba, SP. Eles são referentes a fluxos de  $N_2O$  estimados a partir de câmaras fechadas



distribuídas em ambientes de Floresta Tropical, cultura de Cana-de-Açúcar e Pastagens.

As coletas dos fluxos de  $N_2O$  ( $ng\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) no ambiente de Floresta Topical (Solo Aquecido e Controle) foram realizadas no período de Agosto de 2009 a Agosto de 2010, no ambiente de Cana-de-Açúcar foram de Maio de 2010 a Setembro de 2010 e no ambiente de Pastagens foram de Maio de 2007 a Abril de 2008.

O experimento com a floresta tropical, foi realizado no Parque Estadual da Serra do Mar ( PESH ), no estado de São Paulo, Brasil. O mesmo foi instalado em uma área de  $100 \times 100\ m$ , nesta área, oito câmaras foram fixados de forma aleatória, das quais quatro foram aquecidas no solo em  $5^\circ C$ , e as outras ficaram sem sistema de aquecimento, funcionando como câmaras de controle. Esse esquema experimental foi realizado para avaliar a influência da temperatura crescente do solo nas emissões do  $N_2O$ .

### 3.2.2 Procedimento de Análise

De acordo com Andrade et al., 1998, ao invés de usar-se histogramas que se aproximam da função densidade de probabilidade  $f(x)$  em eventos que se comportam como leis de potências dadas por  $n(x) \sim x^{-\tau}$ , é mais conveniente analisar a função de distribuição acumulada, devido a alta dispersão dos dados reais.

Assim, será utilizada a função de distribuição acumulada dada por:

$$N(x) = N(X > x) = \int_x^M n(x)dx$$

em que  $M$  é a estimativa do evento máximo encontrado no conjunto de dados. Dessa forma é possível evitar flutuações dos dados de emissão de  $N_2O$  do solo.

Para utilizar a probabilidade acumulada dos dados observados, deve-se classificar as observações em ordem decrescente, em seguida, a aproximação de  $N(x)$  correspondente a  $k$ -ésima observação de  $x_k$  é simplesmente  $N_k = K$  (alternativamente, pode-se classificar os dados em ordem crescente, e definir  $N_k = N - k$ ).

O software utilizado para o ajuste dos modelos aos dados em estudo foi o OriginPro 8.5, o mesmo utiliza o algoritmo de Levenberg-Marquardt para a estimação dos parâmetros das funções utilizadas e classifica as melhores funções ajustadas pelo critério do menor Qui-Quadrado Reduzido e do maior  $R^2$  ajustado.

As funções utilizadas para ajuste dos dados foram:

- Modelo SOC no software OriginPro 8.5:  $y = (a * x^{-(tau+1)}) * (1 - (x/M)^{tau-1})$   
onde,  $a$  é uma constante positiva,  $tau = \tau$  e a expressão matemática é dada por:

$$y = a \cdot x^{1-\tau} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{x}{M} \right)^{\tau-1} \right] \quad (3.1)$$

O modelo original do SOC é dado por (ANDRADE et al., 1998):

$$N(x) \sim \frac{\bar{N}(x)}{x} \sim \left( \frac{1}{x} \right)^{\tau-1} \left[ 1 - \left( \frac{x}{M} \right)^{\tau-1} \right] \quad (3.2)$$

Em que  $M$  é a estimativa do evento máximo encontrado no conjunto de dados.

- Modelo Johnson  $S_U$  no software OriginPro 8.5:  $c * (d/s * erf(g + d * log(((x - th)/s) + sqrt(((x - th)/s)^2 + 1))) / sqrt(1 + ((x - th)/s)^2)$

onde,  $c$  é uma constante positiva,  $g = \gamma$ ,  $d = \delta$ ,  $th = \xi$  e  $s = \lambda$  são os parâmetros do modelo original dado por (JOHNSON, 1949):

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi} \sqrt{(y^2 + 1)}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \gamma + \delta \log [ y + \sqrt{(y^2 + 1)} ] \right\}^2 \right] \quad (3.3)$$

Em que  $y = \left( \frac{X-\xi}{\lambda} \right)$ .  $\gamma, \delta$  são parâmetros de forma,  $\lambda$  é um parâmetro de escala,  $\xi$  é um parâmetro de localização.

Utilizou-se os gráficos em escala logarítima e semi-logarítima, porque a apresentação de dados em uma escala logarítmica pode ser mais útil quando os dados cobrem uma grande quantidade de valores. Pois, em uma escala que contém muitos valores pequenos, não é possível visualizar poucos valores grandes, e dessa forma o logarítmo reduz a representação a uma escala mais fácil de ser visualizada e manejada.

### 3.3 Resultados e Discursão

#### 3.3.1 Análise Descritiva

A análise dos resultados será iniciada com uma breve exposição das estatísticas descritivas dos dados e, em seguida, será descrito a análise da criticalidade auto-organizada.

Tabela 1: Estatísticas descritivas para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical sem sistema de aquecimento (Dados de Controle).

n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação
271	0,02415	26,29548	2,97917	0,84867	4,95572	1,66346

Tabela 2: Estatísticas descritivas para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical Aquecido.

n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação
545	0,01904	41,68066	4,11392	1,00693	7,20567	1,75153

Tabela 3: Estatísticas descritivas para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Cana-de-Açúcar.

n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação
675	0,00219	54,87379	1,97722	0,34075	4,7628	2,40884

Tabela 4: Estatísticas descritivas para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Pastagens.

n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação
254	0,01018	53,70965	1,70254	0,40248	5,33411	3,13304

### 3.3.2 Análise da Criticalidade Auto-Organizada

Foi visto que o foco deste trabalho foi o estudo da emissão de  $N_2O$  do solo como um fenômeno criticamente auto-organizado (SOC). Esse fenômeno ocorre em sistemas ditos complexos e geralmente fora do equilíbrio onde as ações de cada parte individual são dominadas pelas interações com as demais partes do conjunto, apresenta auto-organização porque não há nenhum parâmetro externo operando sobre o sistema, que definimos como crítico, e as correlações espaciais e temporais obedecem a uma lei de potência, isto é, exibem invariância de escala.

Por sua vez, as caracterizações dos eventos da emissão do óxido nitroso do solo encontram-se em formas de avalanches, a distribuição de duração e tamanho das avalanches apresentam-se em forma de lei de potência e exibem a presença de interações locais. Com isto, verifica-se grandes semelhanças quanto a certas características dinâmicas importantes para a ocorrência da criticalidade auto-organizada. Um destes atributos diz respeito à distribuição estatística dos eventos que ocorrem em tais sistemas, a qual parece obedecer a uma lei de potência, como ilustrado na figura 5.

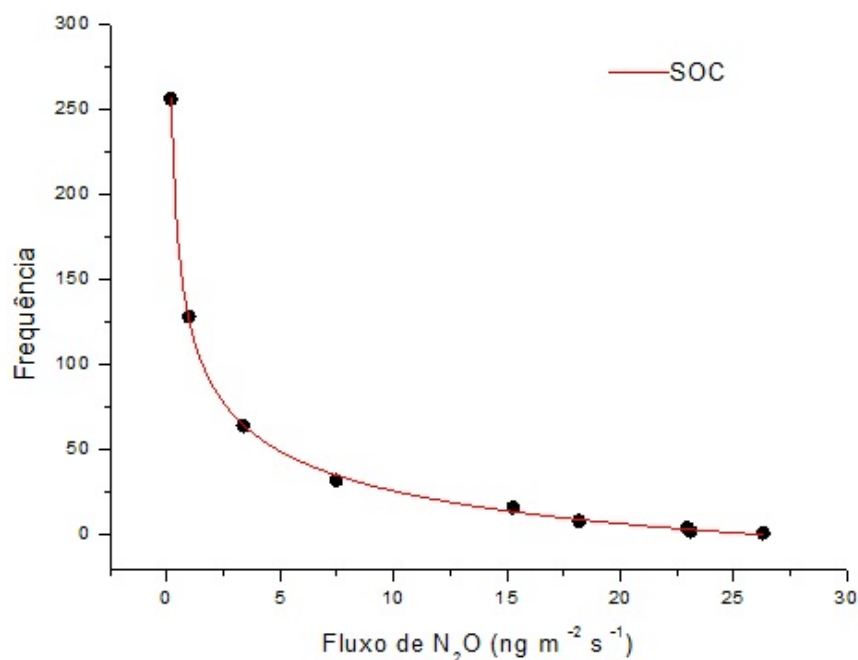


Figura 5: Aspecto geral da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical em temperatura ambiente (Dados originais do trabalho em estudo).

Dessa forma, espera-se um pequeno número de grandes emissões de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical e um grande número de pequenas emissões (figura 5). Pois este sistema de emissão de óxido nitroso do solo, exibe uma ordem global a partir de interações locais

entre as partes que o constituem, e assim ele evolui no tempo e fica próximo do estado crítico auto-organizado, ou seja, a todo tempo acontece muitas emissões de pequenas magnitudes, mas a qualquer momento pode acontecer emissões de grandes magnitudes em pequenas proporções.

### 3.3.2.1 Dados de Floresta Tropical (Controle e Aquecido)

Primeiramente serão analisadas as figuras 6 e 7, referentes aos histogramas e gráficos log-log da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical aquecido e em temperatura ambiente.

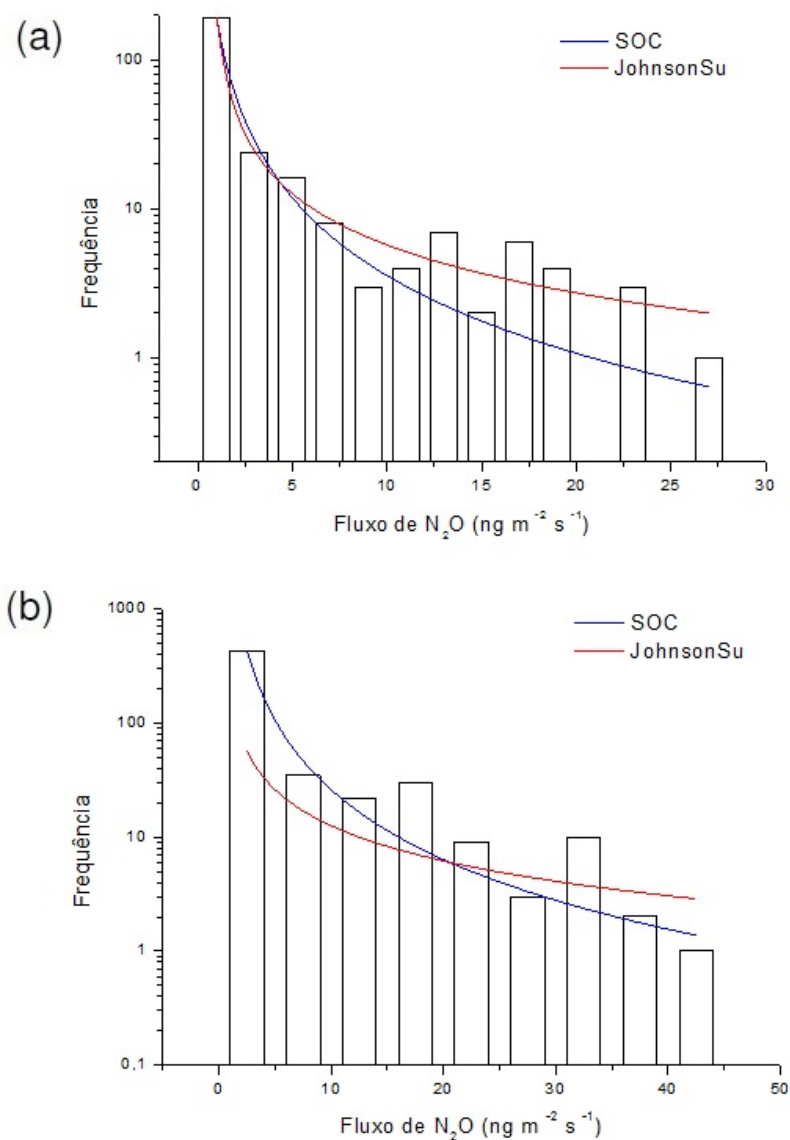


Figura 6: Histograma dos dados originais da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical: (a) Solo em temperatura ambiente (Controle), (b) Solo Aquecido.

Embora Moulin et al. (2011), tenham observado melhores ajustes de dados de  $N_2O$  para distribuição Johnson  $S_U$ , verifica-se que os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical foram melhor ajustados pela curva de distribuição do SOC (figura 6). Além disso, verifica-se que a lei de potência explica melhor a cauda longa dos dados quando vista em escala semi-logarítima (figura 6).

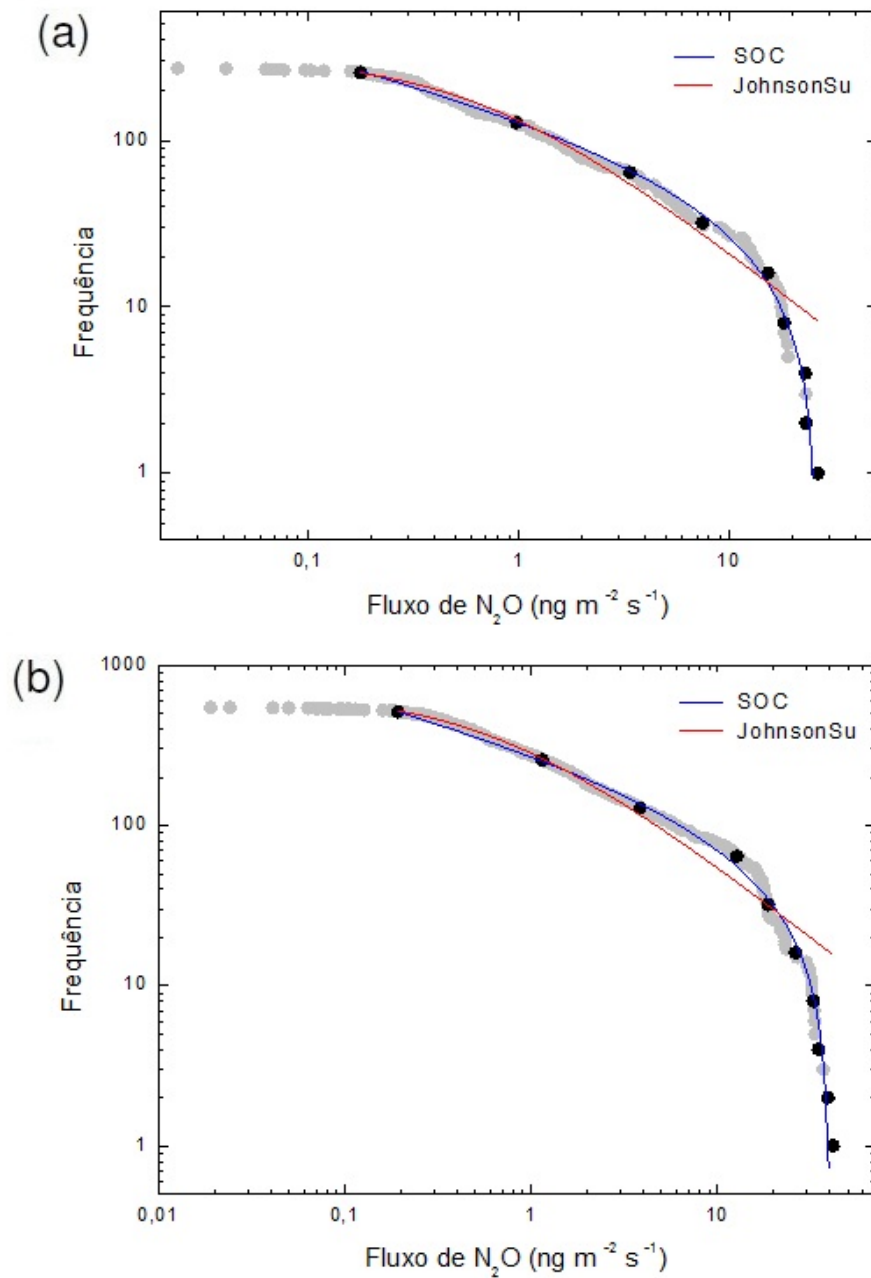


Figura 7: Gráficos Log-Log dos dados originais (cinza) e acumulados (preto) da Emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical: (a) Solo em temperatura ambiente, (b) Solo Aquecido.

Tabela 5: Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson  $S_U$  para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical sem sistema de aquecimento (Dados de Controle).

SOC		Johnson $S_U$	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$a$	208,99015	$c$	281,68547
$\tau$	1,282	$\delta$	0,7877
$M$	26,04112	$\lambda$	0,01299
		$\gamma$	0,0337
		$\xi$	- 0,67848
Reduced Chi-Sqr	3,78871	Reduced Chi-Sqr	72,71863
Adj. R-Square	0,99948	Adj. R-Square	0,99003

Tabela 6: Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição Johnson  $S_U$  para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical com sistema de aquecimento (Dados de Solo Aquecido).

SOC		Johnson $S_U$	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$a$	408,7843	$c$	3149,82057
$\tau$	1,28592	$\delta$	0,27157
$M$	40,17654	$\lambda$	0,09518
		$\gamma$	0,03603
		$\xi$	- 0,39767
Reduced Chi-Sqr	26,12751	Reduced Chi-Sqr	284,53247
Adj. R-Square	0,99904	Adj. R-Square	0,98954

Diante do exposto nas figuras 6 e 7 e nas tabelas 5 e 6, verifica-se que o modelo SOC apresenta o melhor ajuste aos dados de emissão de  $N_2O$  nos solos de Floresta Tropical aquecido e não-aquecido, por apresentar o menor Qui-Quadrado Reduzido e o maior  $R^2$  ajustado, destacando o fracasso da distribuição Johnson  $S_U$  para representar os dados. Confirmando assim, a existência da criticalidade auto-organizada no fenômeno da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical com e sem sistema de aquecimento.

É importante ressaltar, que para os dados com o aumento da temperatura do solo (figuras 6(b) e 7(b)), o parâmetro  $\tau$  ( expoente do modelo SOC) foi equivalente ao expoente dos dados de controle (tabelas 5 e 6), isto deve-se ao fato de que, os dois tipos de solo (aquecido e não-aquecido), pertencem ao mesmo ambiente de Floresta Tropical, onde as características físicas do solo são as mesmas e os processos de emissões do  $N_2O$  são bem semelhantes.

Sabe-se que o modelo SOC se comporta de acordo com funções do tipo lei de potência como foi visto em capítulos anteriores, em que o parâmetro  $\tau$  (expoente do modelo) descreve a inclinação de uma reta no gráfico  $\log \times \log$ . De acordo com Koyama e Hotta (1990), esse parâmetro de inclinação da reta ( $\tau$ ) é utilizado para comparações entre diferentes ambientes, ou seja, modelos com  $\tau$  semelhantes pertencem ao mesmo ambiente, enquanto que modelos com  $\tau$  diferentes pertencem a ambientes distintos.

Por sua vez, o parâmetro  $M$  (intercepto da reta no gráfico  $\log \times \log$ ) que representa a emissão máxima de  $N_2O$  encontrada no conjunto de dados de Floresta Tropical, parece depender do efeito da temperatura do solo. Pois, verifica-se que nos dados de emissão de  $N_2O$  em solo aquecido (tabela 6), o parâmetro  $M$  é bem maior do que nos dados de controle (tabela 5). Segundo Koyama e Hotta (1990), as diferenças encontradas em uma característica física do ambiente em estudo são evidenciadas por variações no valores de  $M$  (intercepto da reta no gráfico  $\log \times \log$ ).

De fato, a temperatura e a umidade são importantes fatores que afetam diretamente a nitrificação e a desnitrificação, pois determinam a atividade dos microrganismos, influenciando a produção de  $N_2O$  e sua difusão para a atmosfera (SIGNOR e CERRI, 2013), uma vez que, a temperatura está ligada diretamente ao ritmo metabólico dos organismos. Segundo Skiba e Smith (2000), as temperaturas do ar e do solo estão relacionadas com os fluxos de  $N_2O$  dos solos, afetando sua magnitude, uma vez que temperaturas mais elevadas favorecem o aumento das taxas de desnitrificação resultando no aumento das emissões do  $N_2O$ .

Dessa forma, verifica-se a grande importância da Criticalidade Auto-Organizada para entender o comportamento da emissão do óxido nitroso no solo de Floresta Tropical. Pois além da curva do SOC ter se ajustado adequadamente a todos os dados de  $N_2O$  (Controle e Aquecido), o modelo mostrou-se fundamental para a estimação e compreensão dos parâmetros em estudo. Através do SOC é possível identificar se os dados de  $N_2O$  são provenientes de um mesmo ambiente utilizando o parâmetro  $\tau$  e ainda estimar a emissão máxima de  $N_2O$  usando o parâmetro  $M$ .

### 3.3.2.2 Dados de Floresta Tropical, Cana-de-Açúcar e Pastagens

Inicialmente serão analisados os histogramas e os gráficos Log-Log dos dados originais dos três solos diferentes. É visto que a lei de potência explica melhor a cauda longa dos dados, quando utilizada na escala semi-logarítmica (fig. 8 e 9).



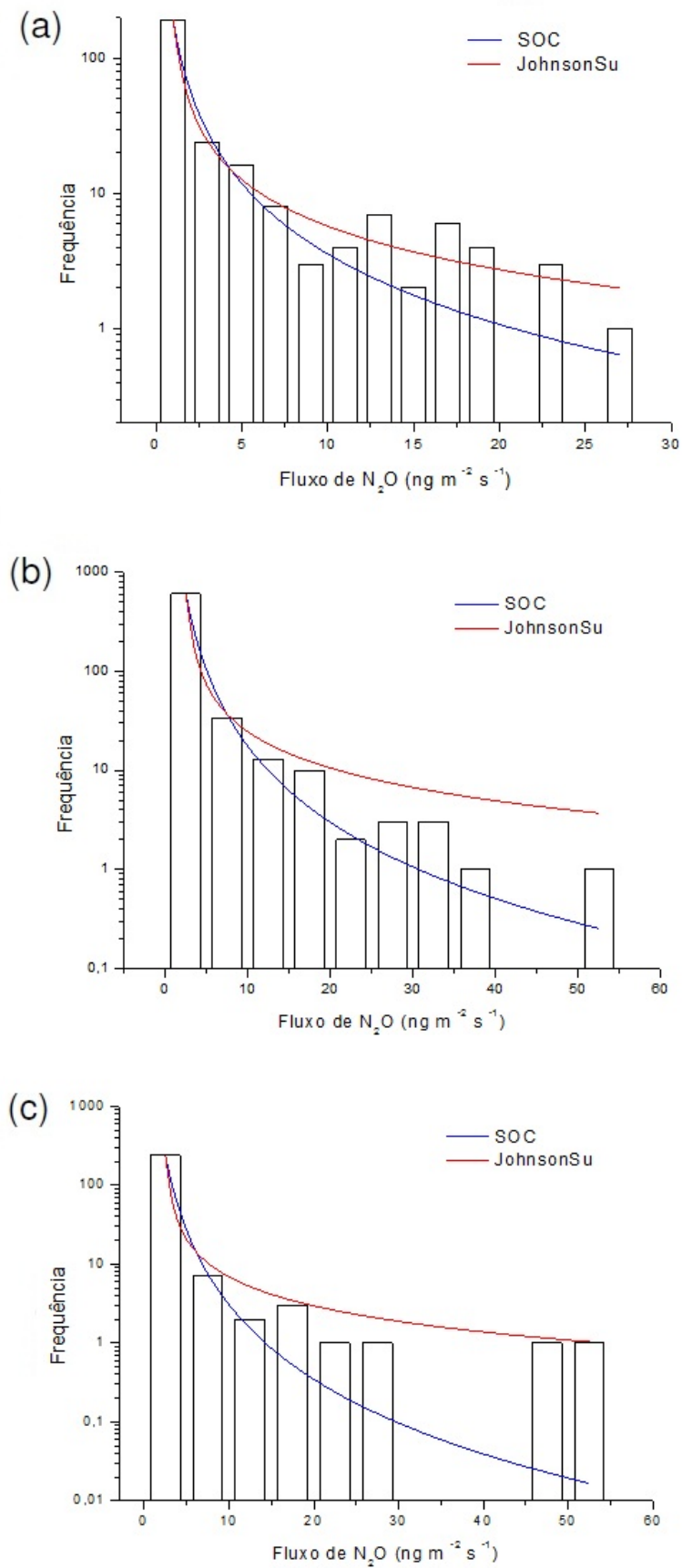


Figura 8: Histogramas dos dados originais da Emissão de  $N_2O$  do solo: (a) Floresta Tropical (Controle), (b) Cultura de Cana-de-Açucar e (c) Pastagens.

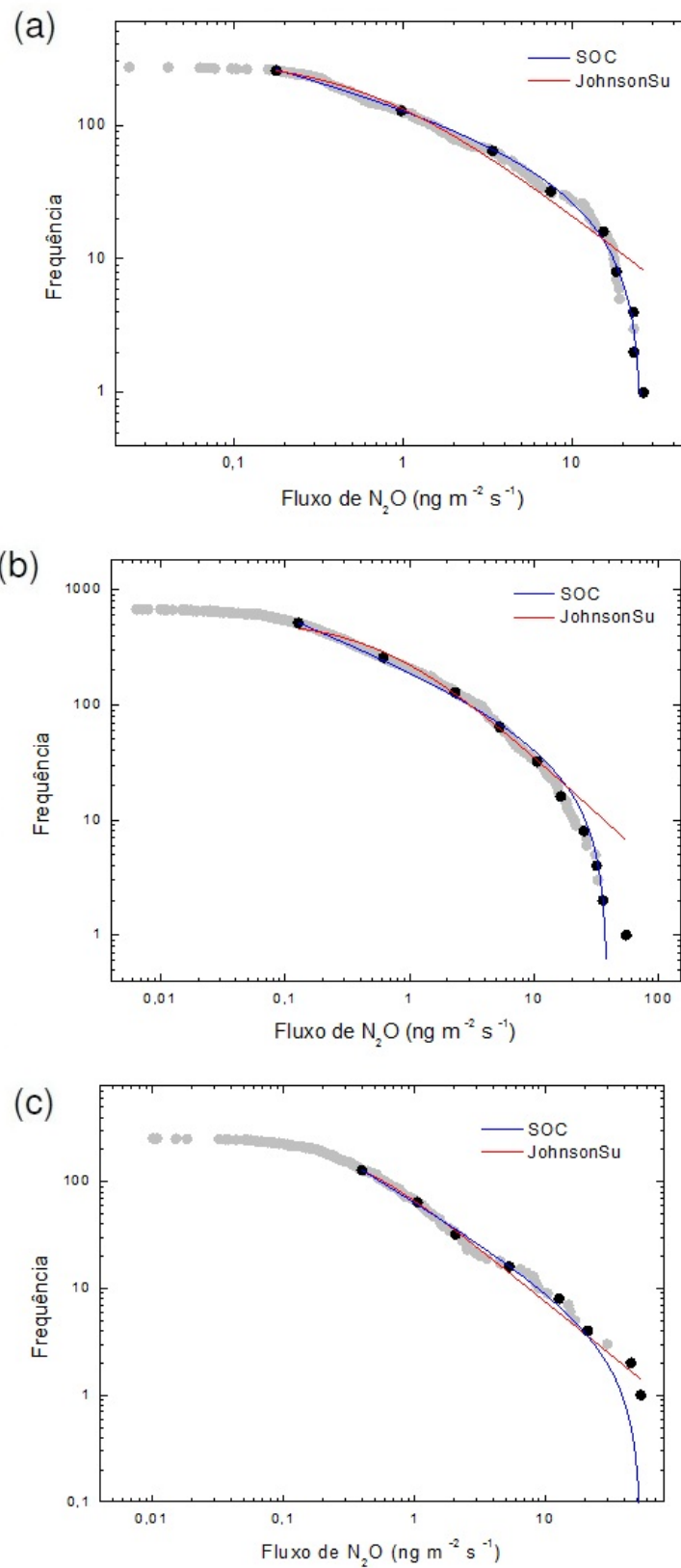


Figura 9: Gráficos Log-Log dos dados originais (Cinza) e Acumulados (Preto) da Emissão de  $N_2O$  do solo: (a) Floresta Tropical (Controle), (b) Cultura de Cana-de-Açúcar e (c) Pastagens.

Tabela 7: Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson  $S_U$  para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical (Controle).

SOC		Johnson $S_U$	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$a$	208,99015	$c$	281,68547
$\tau$	1,282	$\delta$	0,7877
$M$	26,04112	$\lambda$	0,01299
		$\gamma$	0,0337
		$\xi$	- 0,67848
Reduced Chi-Sqr	3,78871	Reduced Chi-Sqr	72,71863
Adj. R-Square	0,99948	Adj. R-Square	0,99003

Tabela 8: Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson  $S_U$  para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Cana-de-Açúcar.

SOC		Johnson $S_U$	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$a$	240,35374	$c$	1000,62576
$\tau$	1,41651	$\delta$	0,34241
$M$	39,06983	$\lambda$	0,01377
		$\gamma$	1,21517
		$\xi$	- 0,55665
Reduced Chi-Sqr	70,26723	Reduced Chi-Sqr	342,11421
Adj. R-Square	0,99742	Adj. R-Square	0,98743

Tabela 9: Estimação dos Parâmetros da distribuição do SOC e da distribuição de probabilidade Johnson  $S_U$  para os dados da emissão de  $N_2O$  do solo de Pastagens.

SOC		Johnson $S_U$	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$a$	67,27018	$c$	328,12789
$\tau$	1,73493	$\delta$	0,34202
$M$	54	$\lambda$	0,06221
		$\gamma$	0,02693
		$\xi$	0,04661
Reduced Chi-Sqr	5,01296	Reduced Chi-Sqr	9,17483
Adj. R-Square	0,99744	Adj. R-Square	0,99532

Diante do que foi apresentado, pode-se dizer que as emissões de  $N_2O$  dos solos de Floresta Tropical, Cultura da Cana-de-Açúcar e Pastagens, foram melhor ajustadas pelo modelo SOC (figuras 8 e 9) pelo critério do menor Qui-Quadrado Reduzido e do maior  $R^2$  ajustado (tabelas 7, 8 e 9). Embora, a distribuição Johnson  $S_U$  tenha se ajustado bem aos

dados de Pastagens, ela não mostrou-se melhor do que o modelo SOC, pois a mesma apresenta uma grande quantidade de parâmetros a serem estimados e não se ajusta adequadamente em todos os ambientes, confirmando assim, o fracasso dessa distribuição para representar os dados de emissão de  $N_2O$  do solo.

Enquanto que, o modelo SOC além de apresentar um ótimo ajuste aos dados de todos os ambientes estudados, ele mostra-se mais prático e eficiente por ter poucos parâmetros a serem estimados e ser de fácil interpretação. Dessa forma, pode-se dizer que a Criticalidade Auto-Organizada descreve muito bem o fenômeno de emissão de  $N_2O$  em solos de Floresta Tropical, Cultura da Cana-de-Açúcar e Pastagens.

No que diz respeito aos parâmetros do modelo SOC, o expoente  $\tau$  mostrou-se bem diferente em todos os ambientes estudados, isto deve-se ao fato de que os solos dos três ambientes apresentam características físicas distintas. Observando a figura 8, verifica-se a existência de um ambiente natural de Floresta Tropical, onde existe uma grande cobertura florestal, e de dois ambientes modificados. A perda dessa cobertura reflete negativamente em importantes ciclos biogeoquímicos, como o do  $N$ . Além disso, a conversão de florestas em pastagens aumenta a quantidade de  $N$  no solo devido à rápida mineralização causada pelo fogo, durante a queima da biomassa vegetal derrubada, embora parte do  $N$  seja perdido sob formas gasosas no momento da queima (FEARNSIDE et al., 2001).

Verifica-se também que o  $\tau_{(Pastagens)} > \tau_{(Cana-de-Açucar)} > \tau_{(Floresta)}$  (Tabelas 7, 8 e 9). Diferenças em  $\tau$  entre ambientes indicam que aquele que possui o modelo SOC com maior  $\tau$  (maior inclinação da reta no gráfico  $\log \times \log$ ) possuirá um maior aumento de  $N(x)$  para qualquer  $x$  em relação a um ambiente de menor  $\tau$ . Como  $N(x)$  é a frequência de emissão de  $N_2O$  do solo, então quanto maior esta frequência, mais poluente é o ambiente que a possui.

Verifica-se também, que a maior estimativa para o parâmetro  $M$ , foi encontrada nos dados de Pastagens (tabela 9). Dessa forma, pode-se dizer que este ambiente foi o que apresentou a emissão de  $N_2O$  de maior magnitude. O fato deste solo ter pouca cobertura vegetal o torna mais exposto a diversos fatores ambientais, e esta característica pode ser muito importante para a ocorrência das emissões de  $N_2O$  observadas neste tipo de solo.

De acordo com Linn e Doran (1984), a umidade do solo é um dos fatores ambientais que pode causar grandes variações nas emissões de  $N_2O$ , pois a taxa de nitrificação aumenta com a saturação de água do espaço poroso e a desnitrificação aumenta com o incremento da umidade, influenciando a atividade microbológica do solo, alterando a produção desse gás. O aumento da umidade do solo resultante de uma alta frequência

de chuvas, também é um fator que potencializa as emissões de  $N_2O$  (PERDORNO et al., 2009). Pois o alagamento do solo provoca inúmeras modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, transformando-o em um ambiente complexo (CAMARGO et al., 1999).

Diante do exposto, observa-se que apesar dos solos com vegetação natural emitirem grandes quantidades de  $N_2O$  globalmente (DENMAN et al., 2007), a cultura da cana-de-açúcar e de pastagens também podem influenciar bastante a emissão desse gás.

## 4 Conclusão Geral

No presente trabalho, apresentou-se grandes semelhanças dos eventos da emissão do óxido nitroso do solo quanto a certas características dinâmicas importantes para a ocorrência da criticalidade auto-organizada, como por exemplo, a distribuição estatística desses eventos obedece a uma lei de potência, onde pode-se esperar um pequeno número de emissões de  $N_2O$  de grande magnitude e um grande número de emissões de pequena magnitude. E com isto, verificou-se que a lei de potência explica melhor a cauda longa dos dados quando vista em escala logarítmica e semi-logarítmica. Confirmou-se a existência da Criticalidade Auto-Organizada no fenômeno de emissão de  $N_2O$  do solo de Floresta Tropical com e sem sistema de aquecimento, em que o ajuste da função de distribuição do SOC foi mais eficiente do que a Johnson  $S_U$ . Além disso, verificou-se que o modelo SOC se ajusta muito bem a todos os dados de emissões de  $N_2O$ , em todos os ambientes estudados (Floresta Tropical, Cultura da Cana-de-Açúcar e Pastagens). Vale ressaltar, que o modelo SOC apresentou mais facilidade e praticidade na estimativa e interpretação dos parâmetros, através dos quais é possível fazer inferências e identificar quais ambientes são mais poluentes, e quais apresentam emissões maiores de  $N_2O$ . Para um trabalho futuro existe a possibilidade de utilizar os dados deste trabalho para estudar modelos microscópicos que apresentem o mesmo  $\tau$  de cada uma das situações aqui apresentadas.

## Referências

- AKIYAMA, H.; TSURUTA, H. Effect of chemical fertilizer form on  $N_2O$ ,  $NO$  and  $NO_2$  fluxes from Andisol field. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 219-230, 2002.
- ANDRADE, R. F. S.; SCHELLNHUBER, H. J.; CLAUSSEN, M. Analysis of rainfall records: possible relation to self-organized criticality. **Physica A**, v. 254, p. 557-568, 1998.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2002. 622 p.
- BAGGS, E. M. Partitioning the components of soil respiration: a research challenge. **Plant Soil**, v. 284, p.1-5, 2006.
- BAK, P. **How nature works: the science of self-organized criticality**. New York: Copernicus, 1996. 212 p.
- BAK, P.; SNEPPEN, K. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. **Physical Review Letters**, v. 71, p. 4083-4086, 1993.
- BAK, P.; TANG, C. Earthquakes as a Self-Organized Critical Phenomenon. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 15635-15637, 1989.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality. **Physical Review A**, v. 38, p. 364-374, 1988.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. **Physical Review Letters**, v. 59, p. 381-383, 1987.
- BANGE, H. W., RAPSOMANIKIS, S., ANDREAE, M. O. The Argean Sea as a source of atmospheric nitrous oxide and methane. **Marine Chemistry**, v. 53, p. 41-49, 1996.
- BEKKU, Y.; KOIZUMI, H.; OIKAWA, T.; IWAKI, H. Examination of four methods for measuring soil respiration. **Applied Soil Ecology**, v. 5, p. 247-254, 1997.
- BODDEY, R.M.; XAVIER, D.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Brazilian agriculture: the transition to sustainability. **Journal of Crop Production**, v.9, p.593-621, 2003.

- BRAKER, G.; SCHWARZ, J. ; CONRAD, R. Influence of temperature on the composition and activity of denitrifying soil communities. **Fems Microbiology Ecology**, v. 73, p. 134-148, 2010.
- BRASSEUR , G. P.; ORLANDO, J. J.; TYNDALL, G. S. **Atmospheric Chemistry and global change**. 1<sup>a</sup> ed. New York, Oxford University Press, 1999. 688 p.
- BROWN, I.F.; MARTINELLI, L.A.; WAYT THOMAS, W.; MOREIRA, M.Z.; CID FERREIRA, C.A.; VICTORIA, R.L. Uncertainty in the biomass of Amazonian forest: an exemple from Rondônia, Brasil. **Forest Ecology and Management**, v.75, p.175-189, 1995.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.
- CARDOSO, A. N.; SAMINEZ, T. C.; VARGAS, M. A. Fluxo de gases-traco de efeito estufa na interface solo/atmosfera em solos de cerrado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 17, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 23 p.
- CARMO, J. B.; ANDRADE, C. A.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N<sub>2</sub>O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 735-746, 2005.
- CARMO, J. B.; SOUSA NETO, E. R.; DUARTE-NETO, P. J.; OMETTO, J. P. H. B.; MARTINELLI, L. A. Conversion of the coastal Atlantic forest to pasture: Consequences for the nitrogen cycle and soil greenhouse gas emissions. **Journal of Environment**, v.148, p. 37-43, 2012.
- CARNEIRO, M. V.; CHARRET, I. C. A Criticalidade Auto-Organizada na Pilha de Areia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4 p. 571-576, 2005.
- CASTRO, P. A. **Algoritmos de Otimização e Criticalidade Auto-Organizada**. Dissertação (Mestrado em Ciências: Física Básica) - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2002. 87 p.
- CHAPIN, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York, Springer Science, 2002. 398 p.
- CLAUSET, A.; SHALIZI, C. R.; NEWMAN, M. E. J. Power-law distributions in empirical data. **SIAM Reviews**, v. 51, p. 661-703, 2009.
- COSTA, F. S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para Avaliação das Emissões de Gases do Efeito Estufa no Sistema Solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v. 36, p. 693-700, 2006.



CRUTZEN PJ. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 96, p. 320-325, 1970.

CRUTZEN, P.J. **Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide**. In: DELWICHE, E. C. C. Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide. New York: John Wiley and Sons, 1981. p. 17-44.

CRUTZEN, P. J.; SOLOMON, S. Response of mesospheric ozone to particle precipitation. **Planetary and Space Science**, v. 28, p. 1147-1153, 1980.

DALAL, R, C.; WANG, W.; ROBERTSON, G. P.; PARTON, W. J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, p. 165-195, 2003.

DAMASCENO, F. **Injeção de dejetos líquidos suínos no solo e inibidor de nitrificação como estratégias para reduzir as emissões de amônia e óxido nitroso**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2010. 122 p.

DAVIDSON, E. A.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PINTO, A. de S. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from soils of native and exotic ecosystems of the Amazon and Cerrado regions of Brazil. **Scientific World Journal**, Newbury, v. 1, p. 312-319, 2001.

DAVIDSON, E.A.; KELLER, M.; ERICKSON, H.E.; VERCHOT, L.V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, v. 50, p. 667-680, 2000.

DAVIDSON, E.A.; VERCHOT, L.V. Testing the hole-in-the-pipe model of nitric and nitrous oxide emissions from soils using the TRAGNET database. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 1035-1043, 2000.

DAVIDSON, E.A.; SWANK, W.T. Environmental parameters regulating gaseous nitrogen losses from two forested ecosystems via nitrification and denitrification. **Applied and Environmental Microbiology**, Baltimore, v. 52, n. 6, p. 1287-1292, 1986.

DENMEAD, O. T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. **Plant Soil**, v. 309, p. 5-24, 2008.

DENMEAD, O. T.; RAUPACH, M. R. **Methods for measuring atmospheric gas transport in agricultural and forest systems**. In: HARPER, L. A.; MOSIER, A. R.; DUXBURY, J. M.; ROLSTON, D. E. Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. Madison: ASA, CSSA e SSSA, 1993. p.19-43.

DROSSEL, B.; SCHWABLE, F. Self-Organized Criticality in a Forest-Fire Model. **Physica A**, v. 191, p. 47-50, 1992.

DUXBURY, J. M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 38, n. 2, p. 151-163, 1994.

ESCOBAR, L.F. **Emissão de Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Manejo em Solo do Planalto Médio do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, 2008. 103 p.

FEARNSIDE, P.M.; GRAÇA, P.M.L.A.; RODRIGUES, F.J.A. Burning of Amazonian rain-forest: Burning efficiency and charcoal formation in forests cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 146, p. 115-128, 2001.

FIELD, C.B.; BEHRENFELD, M.J.; RANDERSON, J.; FALKOWSKI, P. Primary production on the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. **Science**, Washington, v. 281, p. 237-240, 1998.

FIRESTONE, M.K.; DAVIDSON, E.A. Microbiological basis of  $N_2O$  and  $N_2O$  production and consumption in soil. In: ANDREAE, M.O.; SCHIMMEL, D.S. (Ed.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere**. Chichester: Wiley, 1989. p.7-21.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. **Radiative Forcing of Climate Change**. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. New York, Cambridge University Press, Cambridge, 2007. p. 129-234.

FORSTER, P. M. D.; TAYLOR, K. E. Climate forcings and climate sensitivities diagnosed from coupled climate model integrations. **Journal of Climate**, v. 19, p. 6181-6194, 2006.

FROUZ, J.; PIZL, V.; CIENCIALA, E.; KALCIK, J. Carbon storage in post-mining forest, the role of tree biomass and soil bioturbation. **Biogeochemistry**, v. 94, p. 111-121, 2009.

GIACOMINI, S.J.; JANTALIA, C.P.; AITA, C.; URQUIAGA, S.S.; ALVES, B.J.R. Emissão de óxido nitroso com a aplicação de dejetos líquidos de suínos em solo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1653-1661, 2006.

GOMES, J. **Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 151

p.

GU, J.; ZHENG, X.; WANG, Y.; DING, W.; ZHU, B.; CHEN, X.; WANG, Y.; ZHAO, Z.; SHI, Y.; ZHU, J. Regulatory effects of soil properties on background  $N_2O$  emissions from agricultural soils in China. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 295, p. 53-65, 2007.

HAINZL, S.; ZOLLER, G.; KURTHS, J. Self-organized criticality model for earthquakes: Quiescence, foreshocks and aftershocks. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, v. 9, p. 2249-2255, 1999.

HAKEN, H. Self-organization. Scholarpedia, v. 3, 2008. 1401 p. Disponível em: <<http://www.scholarpedia.org/article/Self-organization>>. Acesso em: 22 jun. 2015

HOUGHTON, J. Global warming. **Reports on Progress in Physics**, v. 68, p. 1343-1403, 2005.

HUTCHINSON, G. L.; ROCHETTE, P. Non-Flow-Through Steady-State Chambers for Measuring Soil Respiration: Numerical Evaluation of Their Performance. **Soil Science Society of America**, v. 67, p. 166-180, 2003.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2001: the scientific basis**. United Kingdom: Cambridge University, 2001. 881 p.

JANTALIA, C. P. ; ZOTARELLI, L. ; SANTOS, H P. dos ; TORRES, E. ; URQUIAGA, S. ; BODDEY, R. M. ; ALVES, B. J. R. **Em Busca da Mitigação da Produção de Óxido Nitroso em Sistemas Agrícolas: Avaliação de Práticas Usadas na Produção de Grãos no sul do País**. In: ALVES, B.J. R. ; URQUIAGA, S. ; URQUIAGA, S. ; AITA, C. ; BODDEY, R. M. ; JANTALIA, C. P. ; CAMARGO, F. A. O. Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa. Porto Alegre: Gênese, v. 1, 2006. p. 81-108.

JENSEN, H. J. **Self-Organized Criticality, Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems**. Cambridge University Press, Cambridge, 1998. 170 p.

JOHNSON, J.M.F.; REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R.; SAUER, T.J.; VENTEREA, R.T.; DELL, C.J. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. **Soil e Tillage Research**, v. 83, p. 73-94, 2005.

JOHNSON, N.L. Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation. **Biometrika**, v.36, p. 149-176, 1949.

JORDAN, H.; HERRERA, R. Tropical rain forests: are nutrients really critical? **American Naturalist**, Chicago, v. 117, n. 2, p. 167-180, 1981.

KELLER, M.; GOREAU, T. J.; WOFSEY, S. C.; KAPLAN, W. A.; MCELROY, M. B. Production of nitrous oxide and consumption of methane by forest soils. **Geophysical Research Letters**, vol. 10, p. 1156-1159, 1983.

LEMKE, R.L.; IZAURRALDE, R.C.; NYBORG, M. Seasonal distribution of nitrous oxide emissions from soils in the parkland region. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 1320-1326, 1998.

KOHYAMA, T.; HOTTA, M. Significance of allometry in tropical saplings. **Functional Ecology**, v. 4, p. 515-521, 1990.

KOMULAINEN T. **Self-Similarity and Power Laws**. In: HYOTYNIEMI, H. Complex Systems: Science on the Edge of Chaos. Finland: Report, 2004. p. 109- 122.

LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T.A . A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events. 1. Model structure and sensitivity. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 9759-9776, 1992.

LIMA, M. A. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Caderno de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 451-472, 2002.

LIMA, M. A. Emissão de gases de efeito estufa. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, Brasília, v. 3, n. 17, p. 38-43, 2000.

LINN, D. M.; DORAN J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and no tilled soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 48, p. 1267-1272, 1984.

LIU, X. J.; MOSIER, A. R.; HALVORSON, A. D.; REULE, C. A.; ZHANG, F. S. Dinitrogen and  $N_2O$  emissions in arable soils: effect of tillage, N source and soil moisture. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 9, p. 2362-2370, 2007.

LIU, X.J.; MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; ZHANG, F.S. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated Corn fields. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 276, p. 235-249, 2005.

MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; TOWNSEND, A.R.; VITOUSEK, P.M.; CUEVAS, E.; MCDOWELL, W.; ROBERTSON, G.P.; SANTOS, O.C.; TRESEDER, K. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: Tropical versus temperate forests. **Biogeochemistry**, v. 46, p. 45-65, 1999.

MARTINS, L. F. B. **Alterações nos fluxos de gases do solo e na ciclagem de carbono e nitrogênio após aquecimento do solo em áreas de Mata Atlântica.** Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba, 2011. 89 p.

MATTHIAS, A.D.; BLACKMER, A. M.; BREMNER, J. M. A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils. **Journal of Environmental Quality**, v.9, p.251-256, 1980.

MELILLO, J.M.; MCGUIRE, A.D.; KICKLIGHTER, D.W.; MOORE III, B.; VROSMARTY, C.J.; SCHLOSS, A.L. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, London, v. 363, p. 234-240, 1993.

MOSIER, A.R. **Chamber and isotope techniques.** In: ANDREAE, M.O.; SCHIMEL, D.S. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere. John Wiley e Sons, 1989. p. 175-187.

MOSIER, A.R.; DUXBURY, J.M.; FRENEY, J.R.; HEINEMEYER, O.; MINAMI, K.; JOHNSON, D.E. Mitigating agricultural emissions of methane. **Climatic Change**, v. 40, p. 39-80, 1998.

MOSIER, A. R.; PARTON W. J.; HUTCHINSON, G. L. Modelling nitrous oxide evolution from cropped and native soils. **Ecology Bulletin** , v. 35, p. 229-241, 1983.

MOULIN, A.; TENUTA, M.; LOBB, D.; DUNMOLA, A; YAPA, P. Probability distribution functions for short-term daily nitrous oxide fluxes in a prairie pothole agricultural landscape in western Canada. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 91, p. 303-307, 2011.

MOUSINHO, P. **Glossário.** In: TRIGUEIRO, A. Meio ambiente no século 21. Rio de Janeiro: Sextante, 2003. p. 332-367.

NEFF, J.C.; TOWNSEND, A.R.; GLEIXNERK, G.; LEHMAN, S.J.; TURNBULL, J.; BOWMAN, W.D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. **Nature**, London, v. 419, p. 915-917, 2002.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. **Self-Organization in Nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations.** 1<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley e Sons, 1977. 491 p.

OLIVIER, J. G. J.; BOUWMANA, A.F.; VAN DER HOEKA, K.W.; BERDOWSKI, J.J.M. Global air emission inventories for anthropogenic sources of  $NO_x$ ,  $NH_3$  and  $N_2O$  in 1990. **Environmental Pollution**, v. 102, p. 135-148, 1998.

PATRA, P. K.; LAL, S.; VENKATARAMANI, S.; de SOUSA, S. N.; SARMA, V. V. S. S.; SARDESAI, S. Seasonal and spatial variability in  $N_2O$  distribution in the arabian Sea. **Deepsea Research I**, v. 46, p. 529-543, 1999.

PERDOMO, C.; IRISARRI, P.E.; ERNST, O. Nitrous oxide emissions from an Uruguayan argriculture under different tillage and rotation treatments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 84, n. 2, p. 119-128, 2009.

PES, L. Z. **Fluxo de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009. 91 p.

PRIESEMANN, V.; MUNK, M. H. J.; WIBRAL, M. Subsampling effects in neuronal avalanche distributions recorded in vivo. **BMC Neuroscience**, v. 10, p. 1-20, 2009.

RAMOS, O. **Scale invariant avalanches: a critical confusion**. In: VERESS, B.; SZIGETHY, J. Horizons in Earth Science Research. Nova Science Publishers, v. 3, 2011. p. 157-188.

ROBERTS, D. C.; TURCOTTE, D. L. Fractality and self-organized criticality of wars. **Fractals**, v. 6, p. 351-357, 1999.

SCHLESINGER, W. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**. 2<sup>a</sup> ed. San Diego, CA: Academic Press, 1997. 588 p.

SCHEINKMAN, J. A.; WOODFORD, M. Self-organized criticality and economic fluctuations. **American Journal of Economics**, v. 84, p. 417-421, 1994.

SERUGENDO, G. DI M.; GLEIZES, M. P.; KARAGEORGOS, A. Self-organization in multi-agent systems. **The Knowledge Engineering Review**, v. 20, p. 165-189, 2005.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322-338, 2013.

SKIBA, U.; SMITH, K. A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. **Chemosphere - Global Change Science**, v.2, p. 379-386, 2000.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. New York, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

SONG, W.; WEICHENG, F.; BINGHONG, W.; JIANJUN, Z. Self-organized criticality of forest fire in China. **Ecological Modelling**, v. 145, p. 61-68, 2001.

SOUSA NETO, E. R. **Perdas de nitrogênio pela emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ) e sua relação com a decomposição da serrapilheira e biomassa de raízes na floresta de Mata Atlântica.** Dissertação (mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba, 2008. 80 p.

STEVENS, R.J.; LAUGHLIN, R.J.; BURNS, L.C.; ARAH, J.R.M.; HOOD, R.C. Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from the soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 2, p. 139-151, 1997.

VERTES, P. E.; BASSETT, D. S.; DUKE, T. Scale-free statistics of neuronal assemblies predict learning performance. **BMC Neuroscience**, v. 12, p. 04, 2011.

YANAI, J.; SAWAMOTO, T.; OE, T.; KUSA, K.; YAMAKAWA, K.; SAKAMOTO, K.; NAGANAWA, T.; INUBUSHI, K.; HATANO, R.; KOSAKI, T. Spatial variability of nitrous oxide emissions and their soil-related determining factors in an agricultural field. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 1965-1977, 2003.