



EMANUELLE ARANTES PAIXÃO

**TRANSLOCAÇÃO DE FAUNA SUBTERRÂNEA PARA
CAVIDADES ARTIFICIAIS: ANÁLISE ESPACIAL E
MODELAGEM BASEADA EM AGENTES**

LAVRAS - MG

2014

EMANUELLE ARANTES PAIXÃO

**TRANSLOCAÇÃO DE FAUNA SUBTERRÂNEA PARA CAVIDADES
ARTIFICIAIS: ANÁLISE ESPACIAL E MODELAGEM BASEADA EM
AGENTES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia de Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Rodrigo Lopes Ferreira

Coorientadores

Dr. Crysttian Arantes Paixão

Dr. Thadeu Josino Pereira Penna

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Paixão, Emanuelle Arantes.

Translocação de fauna subterrânea para cavidades artificiais : análise espacial e modelagem baseada em agentes / Emanuelle Arantes Paixão.
– Lavras : UFLA, 2014.

168 p. : il.

Orientador: Rodrigo Lopes Ferreira.

Bibliografia.

1. Análise espacial de padrão de pontos. 2. Dinâmica populacional.
3. Rede trófica. 4. Sistemas subterrâneos ferruginosos - Conservação.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 591.5

EMANUELLE ARANTES PAIXÃO

**TRANSLOCAÇÃO DE FAUNA SUBTERRÂNEA PARA CAVIDADES
ARTIFICIAIS: ANÁLISE ESPACIAL E MODELAGEM BASEADA EM
AGENTES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia de Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de Agosto de 2014.

Dr. Thadeu Josino Pereira Penna

UFF

Dr. Marcelo Passamani

UFLA

Dr. Marcelo Silva de Oliveira

UFLA

Dr. Rodrigo Lopes Ferreira
Orientador
Dr. Crysttian Arantes Paixão
Coorientador

LAVRAS - MG

2014

Aos meus pais, Cássia e Osvaldo; aos meus irmãos, Crysttian e Richard; aos meus avós, Maria Isabel, Gabriel, Amélia e Sebastião, e ao meu Tio João.

dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela força e estímulo para realizar todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho e pela oportunidade de conquistar este grande sonho.

À minha família, pelo apoio incondicional e força para vencer todas as batalhas e superar todos os obstáculos.

Ao meu Orientador Rodrigo Lopes Ferreira e aos Coorientadores Crysttian Arantes Paixão e Thadeu Josino Pereira Penna pelo incentivo, paciência e conhecimentos adquiridos durante esse período de grande trabalho e crescimento profissional e pessoal.

Aos meus Amigos, Colegas e Companheiros de Laboratório pelo incentivo, ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores que contribuíram para o enriquecimento dos meus conhecimentos e consequentemente para o meu desenvolvimento e formação profissional.

Aos Professores Membros da Banca, pela disponibilidade e valiosas sugestões sobre o trabalho.

À Universidade Federal de Lavras pela estrutura e oportunidade de desenvolver este trabalho e também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelas bolsas e auxílios financeiros.

Agradeço também à Dança de Salão, que foi uma descoberta muito especial durante esse período e que indiscutivelmente me deu muita força e determinação para alcançar os meus objetivos.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste grande sonho. Muito obrigada por cada sorriso, abraço, bom dia e boa tarde, que alegraram os meus dias, me fortaleceram e me incentivaram a superar todas as dificuldades e a alcançar esta conquista tão especial e significativa.

Muito obrigada!

“Há quem me julgue perdido,
porque ando a ouvir estrelas. Só
quem ama tem ouvido para ouvi-las
e entendê-las...”

Olavo Bilac

“Primeiro eles te ignoram, depois
riem de você, depois brigam, e
então você vence.”

Mahatma Gandhi

RESUMO GERAL

O Brasil possui um amplo potencial espeleológico, porém muito pouco é conhecido sobre sua fauna. Ainda existe pouco conhecimento sobre a biologia e ecologia de animais cavernícolas. Esse entendimento é fundamental para o desenvolvimento de alternativas de manejo e conservação mais eficazes. No Brasil, o Decreto 99556/90 (Art.2) estabelece a proteção de sistemas subterrâneos, porém o Decreto nº 6640 estabelece que a proteção integral é apenas para as cavidades que apresentam máxima relevância ambiental. Nesse contexto, torna-se necessário pensar em alternativas que visem a conservação desses sistemas, que são amplamente ameaçados. Uma dessas alternativas pode ser a translocação de fauna, que já foi realizada para diversos grupos animais. Porém, existe apenas um registro de translocação de fauna cavernícola, que envolveu a utilização de uma mina já existente como cavidade receptora da fauna translocada. O primeiro experimento de translocação de fauna cavernícola, que envolveu a construção de uma galeria artificial, foi o realizado pelo Dr. Rodrigo Lopes Ferreira, em 2004. Dessa maneira, essa dissertação apresenta como principais objetivos: descrever o experimento realizado por Ferreira, destacando as principais etapas de construção da galeria; ampliar o conhecimento sobre algumas espécies envolvidas no experimento, por meio de análises espaciais de padrão de pontos, além de propor uma rede trófica associando tais espécies; propor o desenvolvimento de um Modelo Baseado em Agentes (MBA) para descrição do sistema e a realização de futuras previsões, que permitam a avaliação da efetividade do experimento de translocação realizado. Espera-se que os resultados aqui obtidos contribuam para a evolução do conhecimento científico sobre a biologia e ecologia de sistemas subterrâneos ferruginosos e também para o desenvolvimento de estratégias que visem a conservação desses sistemas.

Palavras-chave: Análise Espacial de Padrão de Pontos. Dinâmica populacional. Rede trófica. Sistemas subterrâneos ferruginosos - Conservação.

GENERAL ABSTRACT

Brazil has a large speleological potential, but very little is known about its fauna. There is still little knowledge about the biology and ecology of the cave animals. This understanding is critical for a more effective development of management and conservation alternatives. In Brazil, the Decree 99556/90 (Art.2) establishes the protection of underground systems, however Decree 6640 states that full protection is only for caves showing maximum environmental relevance. In that context, it becomes necessary to consider alternatives for the conservation of these systems, which are increasingly threatened. One of these alternatives can be the wildlife translocation, which has been performed for several animal groups. However, there is only one record of cave fauna translocation, which involved the use of an already existing mine as receiving cavity of the translocated fauna. The first translocation experiment of cave fauna, which involved the construction of an artificial gallery, was undertaken by Dr. Rodrigo Lopes Ferreira in 2004. Thus, this dissertation presents the following main objectives: to describe the experiment conducted by Ferreira, highlighting the main stages of the gallery construction; to expand the knowledge of some species involved in the experiment by using Spatial Point Pattern Analysis, besides proposing a food web involving such species; to propose the development of an Agent Based Model (ABM) for the description of the system and the performance of forward predictions, which allow the evaluation of the effectiveness of the translocation experiment. It is expected that the presented results contribute to the evolution of the scientific knowledge on the biology and ecology of ferruginous underground systems and also for the development of strategies for the conservation of such systems.

Keywords: Spatial Point Pattern Analysis. Populational dynamics. Food web. Ferruginous underground systems - Conservation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	Introdução Geral	14
1	INTRODUÇÃO GERAL E REFERENCIAL TEÓRICO	15
	REFERÊNCIAS	19
CAPÍTULO 2	Translocação de fauna subterrânea em um sistema ferruginoso neotropical	22
1	INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO	25
2	METODOLOGIA	29
2.1	Histórico de translocações em cavernas	29
2.2	Justificativa para a realização do experimento	30
2.3	Escolha da área para a construção da cavidade	31
2.4	Construção da cavidade	35
2.5	Preparação da cavidade	44
2.5.1	Fornecimento de microhabitats	44
2.5.2	Fornecimento de recursos tróficos	44
2.6	Translocação da fauna subterrânea	48
2.7	Monitoramento	52
2.7.1	Proposta inicial da ação de monitoramento pós-soltura	52
3	RESULTADOS	54
3.1	O meio externo à cavidade	54

3.2	Espécies vegetais transplantadas.	54
3.3	O ambiente físico da galeria (topoclima).	56
3.4	Importação biológica de nutrientes para a galeria	57
3.5	Oscilação temporal da comunidade (extinções e colonizações) . . .	59
3.6	Grupos troglomórficos	69
3.7	Eventos reprodutivos	72
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS.	78
	CAPÍTULO 3 ANÁLISE ESPACIAL DE UMA REDE TRÓFICA	
	ESTABELECIDA EM UMA GALERIA ARTIFICIAL	80
1	INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO.	83
2	METODOLOGIA	85
2.1	Organização dos Dados para Análise	85
2.2	Seleção dos Dados para Análise	89
2.3	Análise Espacial de Padrão de Pontos.	92
3	RESULTADOS	99
4	DISCUSSÃO	113
	REFERÊNCIAS.	122
	CAPÍTULO 4 Modelagem Baseada em Agentes de uma Rede Tró-	
	fica de Sistema Cavernícola Ferruginoso.	126
1	INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO.	129

2	METODOLOGIA	132
2.1	Dados Analisados	132
2.2	Modelo Baseado em Agentes	135
3	RESULTADOS	148
3.1	Processo de Caminhada Bidimensional	148
3.2	Simulação da Dinâmica Populacional	150
4	TRABALHOS FUTUROS	164
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
	REFERÊNCIAS	167

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO GERAL E REFERENCIAL TEÓRICO

O potencial espeleológico nacional é superior a 100.000 cavernas (AULER; RUBBIOLI; BRANDI, 2001). Porém, segundo o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV (2014), apenas 13.389 cavidades encontram-se registradas até o momento. O Brasil por apresentar uma das maiores reservas de minério de ferro mundiais, também possui um dos maiores potenciais espeleológicos nessa litologia (AULER; PILÓ, 2005), estimado em aproximadamente 10.000 cavidades, das quais apenas 2.000 são conhecidas (PILÓ; AULER, 2011).

As cavernas em minério de ferro e canga apresentam uma significância particular, porque representam uma área extremamente nova para a espeleologia científica e esportiva. Ainda existe pouco conhecimento sobre a geologia e biologia desses sistemas (AULER; PILÓ, 2005). Porém, nos últimos anos, muitos trabalhos estão enfocando estas cavernas. Pesquisas destacam as riquezas biológicas desses sistemas (FERREIRA, 2005; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011), avaliam seus aspectos arqueológicos (BAETA; PILÓ, 2005) e abordam suas questões geológicas (PILÓ; AULER, 2005).

As cavidades em minério de ferro são singulares, porque apresentam elevada riqueza, diversidade, complexidade biológica e baixa similaridade quando comparadas à cavernas desenvolvidas em outras litologias (FERREIRA, 2005; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Além disso, tais ambientes apresentam, em média, uma riqueza maior de invertebrados troglomórficos quando comparados à cavidades em outras litologias (SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Mesmo as comunidades de ambientes ferruginosos da mesma localidade apresentam baixa similaridade. Esse fato destaca a importância da estru-

tura física e trófica para determinação das espécies que apresentam viabilidade de colonização e permanência nesses ambientes (FERREIRA, 2005).

De forma geral, as cavernas apresentam considerável importância para o equilíbrio de ecossistemas em suas áreas de ocorrência (FERREIRA, Rodrigo, 2011). Entretanto, diversas atividades antrópicas são causadoras de impactos nesses sistemas como a mineração, agropecuária, turismo, represamentos, urbanização e obras de engenharia. A mineração é um dos principais impactos que promove a degradação de cavernas em sistemas ferruginosos, uma vez que tais cavidades geralmente estão associadas aos maiores teores de ferro (FERREIRA, Cristiano, 2011).

O Decreto 99556/90 (Art. 2) (BRASIL, 1990) estabeleceu proteção integral do patrimônio espeleológico brasileiro, garantindo a preservação da integridade dos ecossistemas cavernícolas. Porém, a partir de 07 de Novembro de 2008, com a promulgação do Decreto Federal nº 6640 (BRASIL, 2008), as cavernas passaram a ser classificadas em quatro graus de relevância: máximo, alto, médio e baixo. Por meio desse decreto, apenas as cavernas com máxima relevância não poderão sofrer impactos ambientais, sendo totalmente protegidas. Assim, torna-se necessário pensar em alternativas para a conservação desses sistemas. Nesse contexto, a translocação de fauna apresenta-se como uma possível alternativa.

Translocação, segundo a *International Union for Conservation of Nature* - IUCN (2013), pode ser definida como um movimento, mediado por humanos, de organismos vivos de uma área com soltura em outra. Esse movimento pode ser realizado tendo diversos objetivos, entre eles a conservação. Assim, pode-se definir a Translocação de Conservação como o movimento intencional e soltura de um organismo vivo tendo como objetivo principal o benefício da conservação (IUCN, 2013). Essa soltura de animais, em termos de conservação, apresenta

primeiramente como principal objetivo a sobrevivência dos animais após a soltura. Os dois próximos objetivos são o estabelecimento dos animais na nova área e o seu sucesso reprodutivo (FESTA-BIANCHET; APOLLONIO, 2003; GOSLING; SUTHERLAND, 2000; LETTY et al., 2003).

Diversos experimentos de translocação de fauna já foram desenvolvidos, englobando desde répteis (TOWNS; FERREIRA, 2001), aves (MARTÍNEZ – ABRAÍN et al., 2011; ORO et al., 2011), mamíferos (BAKER et al., 2011) até artrópodes (CARROLL et al., 2009; HOCHKIRCH et al., 2007; LEROY et al., 2013). Na literatura, há apenas um registro de translocação de fauna em ambientes cavernícolas (ELLIOTT, 1978). Nesse trabalho, Elliott, com o objetivo de proteger a espécie *Banksula melones*, fez um trabalho de transferência de fauna de uma cavidade natural, que seria destruída, para uma mina já existente. Porém, até então, não há nenhum registro de uma translocação que envolveu a construção de uma galeria artificial com a finalidade de receber espécies provenientes de uma caverna natural. Esse experimento foi realizado por Ferreira, em 2004, e apresentou o objetivo principal de conservar a comunidade natural existente que seria eliminada com a destruição da sua cavidade natural, devido a expansão de uma lavra de minério de ferro.

Green et al. (2005) ressaltam que as relações estabelecidas entre a Ecologia, Matemática, Estatística, Informática e Ciência da Computação são essenciais para uma maior compreensão de sistemas ecológicos complexos. A interface entre essas disciplinas é rica e o potencial impacto de pesquisas interdisciplinares é ilimitado (GREEN et al., 2005).

Dessa maneira, o trabalho aqui apresentado é dividido da seguinte forma: Capítulo 2, correspondente a descrição do experimento realizado por Ferreira, em 2004, destacando as etapas de construção da cavidade artificial, além de detalhes

sobre a translocação realizada, monitoramentos e resultados observados; Capítulo 3, Análise Espacial de Padrão de Pontos dos dados de abundância e distribuição espacial das espécies registradas durante o experimento e proposta de uma rede trófica e Capítulo 4, proposta de um Modelo Baseado em Agentes para futura descrição do sistema estudado.

REFERÊNCIAS

AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 70–72, jul. 2005.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 227 p.

BAETA, A.; PILÓ, H. Arqueologia do quadrilátero ferrífero aspectos preliminares sobre sua ocupação estudo de caso do Capão Xavier. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 116–131, jul. 2005.

BAKER, J. D. et al. Translocation as a tool for conservation of the Hawaiian monk seal. **Biological Conservation**, v. 144, p. 2692–2701, 2011.

BRASIL. Decreto-lei n. 99.556 de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 2 out. 1990. Seção 1. Disponível em: < [http : //www2.camara.gov.br/legin/fed/decret/1990/decreto – 99556 – 1 – outubro – 1990 – 339026 – normaatualizada – pe.html](http://www2.camara.gov.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99556-1-outubro-1990-339026-normaatualizada-pe.html) >. Acesso em: 15 jun. 2014.

BRASIL. Decreto n. 6.640, de 7 de Novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 nov. 2008. Seção 1. Disponível em: < [http : //www.planalto.gov.br/ccivil_03/Atto2007 – 2010/2008/Decreto/D6640.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Atto2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm) >. Acesso em: 15 jun. 2014.

CARROLL, M. J. et al. Climate change and translocations: The potencial to re-establish two regionally-extinct butterfly species in Britain. **Biological Conservation**, v. 142, p. 2114–2121, 2009.

CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS. **Base de dados geoespacializados de cavidades naturais subterrâneas do CECAV**. Brasília, 2014. Disponível em: < [http : //www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html](http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html) >. Acesso em: 10 jun. 2014.

ELLIOTT, W. R. **Final report on the New Melones cave harvestman transplant**. Contract #DACW05 – 78 – C – 0007#, U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Califórnia, 1978.

FERREIRA, C. F. Análise de impactos ambientais em terrenos cársticos e cavernas. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 123–148.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea em campos ferruginosos. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 106–115, jul. 2005.

FERREIRA, R. L. Biologia Subterrânea. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 89–122.

FESTA-BIANCHET, M.; APOLLONIO, M. **Animal behavior and wildlife conservation**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.

GOSLING, L. M.; SUTHERLAND, W. J. **Behaviour and conservation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

GREEN, J. L et al. Complexity in ecology and conservation: Mathematical, statistical, and computational challenges. **Bioscience**, v. 55, n. 6, p. 501–510, jun. 2005.

HOCHKIRCH, A. et al. Translocation of an endangered insect species, the field cricket (*Gryllus campestris* Linnaeus, 1758) in northern Germany. **Biodiversity Conservation**, v. 16, p. 3597–3607, 2007.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Guidelines for reintroductions and other conservation translocations**. Switzerland, 2013. 57 p. Disponível em: < https://www.iucn.org/news_homepage/news_by_date/?13377/New-Guidelines-on-conservation-translocations-published-by-IUCN >. Acesso em: 10 mai. 2014.

LETTY, J. et al. Effect of translocation on survival in wild rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). **Mammalian Biology**, v. 68, p. 250–255, 2003.

MARTÍNEZ-ABRAÍN, A. et al. Cost-effectiveness of translocation options for a threatened waterbird. **Conservation Biology**, v. 25, n. 4, p. 726–735, 2011.

ORO, D. et al. Lessons from a failed translocation program with a seabird species: Determinants of success and conservation value. **Biological Conservation**, v. 144, p. 851–858, 2011.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à espeleologia. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 7–24.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the brazilian atlantic rain forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 1713–1729, 2011.

TOWN, D. R.; FERREIRA, S. M. Conservation of New Zealand lizards (Lacertilia: Scincidae) by translocation of small populations. **Biological Conservation**, v. 98, p. 211–222, 2001.

CAPÍTULO 2

**TRANSLOCAÇÃO DE FAUNA SUBTERRÂNEA EM UM SISTEMA
FERRUGINOSO NEOTROPICAL**

RESUMO

Sistemas subterrâneos ferruginosos são ambientes singulares, que apresentam comunidades bastante complexas, elevada riqueza, diversidade, complexidade biológica e baixa similaridade quando comparadas à cavernas em outras litologias. Certas características são bastante peculiares a estes sistemas: grande quantidade de canalículos e aparente superficialidade. De forma geral, os organismos cavernícolas são classificados em três categorias: troglóxenos, troglófilos e troglóbios. Os sistemas tróficos de ambientes subterrâneos ferruginosos apresentam dominância de espécies de habitats intersticiais e base trófica constituída principalmente por raízes de vegetação externa, além da presença, em quantidades menores, de matéria orgânica e guano. Outra característica desses sistemas é a presença comum de fungos. Devido ao grande desconhecimento sobre esses sistemas e a sua elevada singularidade, torna-se necessário pensar em alternativas para a sua conservação. Nesse contexto, o experimento realizado por Ferreira, em 2004, pode fornecer indícios e evidências sobre uma possível alternativa. Dessa maneira, o objetivo principal desse trabalho é descrever tal experimento, que corresponde à translocação de fauna cavernícola de uma cavidade natural para uma galeria artificial. Nessa descrição, serão destacadas as principais etapas de construção da galeria, translocação, monitoramentos pós-soltura e também observações e resultados obtidos durante o desenvolvimento do experimento, que podem fornecer evidências para uma avaliação inicial sobre a eficiência dessa ação de manejo.

Palavras-chave: Capão Xavier II. Monitoramento pós-soltura. Colonização. Espécies troglomórficas. Oscilações populacionais.

ABSTRACT

Ferruginous underground systems are unique environments which present quite complex communities, high richness, diversity, biological complexity and low similarity when compared to caves in the other lithologies. Certain characteristics are quite typical to these systems: large amounts of tubules and apparent superficiality. In general, the cave organisms are classified into three categories: troglonexes, troglóphiles and troglóbites. Trophic systems of ferruginous underground environments present dominance of interstitial habitats species and trophic base consisting mainly by external vegetation roots and guano and organic matter in smaller quantities. Another characteristic of these systems is the common presence of fungi. Due to considerable lack of knowledge about these systems and their high uniqueness, it is necessary to consider alternatives for their conservation. In this context, the experiment conducted by Ferreira in 2004 may provide clues and some evidence about a possible alternative. Under this purpose, the main objective of this paper is to describe such an experiment corresponding to the translocation of cave fauna from a natural cavity to an artificial gallery. In this description, the main construction steps of the gallery, translocation, post-release monitoring and also observations and results obtained during the development of the experiment will be highlighted. These observations and results can provide some evidence for an initial evaluation on the effectiveness of this management action.

Keywords: Capão Xavier II. Post-release monitoring. Colonization. Troglomorphic species. Population changes.

1 INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

Até pouco tempo, existiam poucos estudos bioespeleológicos sobre cavernas desenvolvidas em sistemas ferruginosos (FERREIRA, 2005). Segundo Ferreira (2005), havia um desinteresse sobre a fauna associada a estes sistemas, porque acreditava-se que tais cavernas pudessem ser pouco diversas biologicamente, devido à sua reduzida dimensão. Porém, recentes estudos revelaram que essas cavidades apresentam comunidades complexas que vivem sob condições bastante peculiares (FERREIRA, 2005). Segundo Ferreira (2005) e Silva, Martins e Ferreira (2011), as cavidades em minério de ferro são singulares, porque apresentam elevada riqueza, diversidade, complexidade biológica e baixa similaridade quando comparadas à cavernas desenvolvidas em outras litologias. Além disso, tais ambientes apresentam, em média, uma riqueza maior de invertebrados troglomórficos quando comparados à cavidades em outras litologias (SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Nestas comunidades, têm sido encontradas muitas espécies troglomórficas, que evoluíram nestes sistemas. As cavernas desenvolvidas nessa litologia apresentam-se como ambientes variáveis, porém com elevado potencial ao estabelecimento de comunidades biológicas (FERREIRA, 2005).

Sistemas subterrâneos ferruginosos apresentam como uma de suas principais características a existência de numerosos canalículos (FERREIRA, 2005). Esses são canais de pequeno diâmetro, que formam uma extensa rede de espaços intersticiais, denominados meso e microcavernas, conectados às macrocavernas (FERREIRA, 2005; PILÓ; AULER, 2005). Essa característica também pode ser observada em outras litologias, como em tubos de lava (HOWARTH, 2001). Os canalículos são importantes tanto para a geração da morfologia final das cavidades (PILÓ; AULER, 2005) quanto para a fauna (FERREIRA, 2005). Eles per-

mitem um intercâmbio entre os elementos da fauna do sistema epígeo (ambiente externo) e hipógeo (ambiente subterrâneo), que é favorecido pela relativa superficialidade das cavernas ferruginosas. Essa característica justifica a considerável variação da composição de espécies observada nessas cavidades. Essas estruturas também possibilitam migrações de fauna entre cavidades próximas, contribuindo para a manutenção da diversidade- β de cada área (FERREIRA, 2005).

A maior parte das cavernas ferruginosas apresenta reduzida extensão. Porém, ambientes de macrocavernas representam apenas uma parte dos habitats que são utilizados pelas espécies. Isso porque os canalículos formam uma extensa rede de microhabitats que revelam uma grande riqueza de espécies (FERREIRA, 2005). Souza-Silva, Martins e Ferreira (2011) destacam a importância das características heterogêneas dos microhabitats na determinação da forte tendência de aumento de espécies com o aumento da projeção linear das cavidades.

Os organismos cavernícolas, de forma geral, podem ser classificados em três categorias (HOLSINGER; CULVER, 1988):

1. Os troglóxenos são regularmente encontrados no ambiente subterrâneo, mas saem regularmente do mesmo para se alimentar. Frequentemente ocorrem nas proximidades das entradas das cavernas, mas eventualmente grandes populações de troglóxenos podem ocorrer em locais mais distantes das entradas. Desta forma, muitos destes organismos atuam como importadores de energia do meio epígeo, sendo muitas vezes os principais responsáveis pelo fluxo energético em sistemas cavernícolas, como em cavernas permanentemente secas.
2. Os troglófilos são capazes de completar seu ciclo de vida no meio hipógeo e/ou epígeo. Neste último, os troglóxenos e troglófilos geralmente ocorrem em ambientes úmidos e sombreados. Certas espécies podem, ainda, serem

troglóxenas sob certas circunstâncias e troglófilas em outras (e.g. cavernas com grande disponibilidade de alimento).

3. Os troglóbios são restritos ao ambiente cavernícola. Por isso, podem apresentar diversos tipos de especializações (morfológicas - e.g. redução das estruturas oculares e a despigmentação - fisiológicas ou comportamentais) que provavelmente evoluíram em resposta às pressões seletivas presentes em cavernas e/ou à ausência de pressões seletivas típicas do meio epígeo.

Os sistemas tróficos de ambientes subterrâneos ferruginosos apresentam como característica marcante a dominância de espécies de habitats intersticiais, ou seja, espécies que apresentam preferência em se abrigar sob rochas, fendas e outros espaços intersticiais. A base trófica desses sistemas são raízes de vegetação externa, fato pouco comum em cavernas brasileiras (SOUZA-SILVA, 2003), porém fundamentais em determinados sistemas subterrâneos, como em tubos de lava no Havaí e nas Ilhas Canárias (HOWARTH, 2001). Como fontes de recurso, embora raros, também são encontrados matéria orgânica vegetal e guano. Outra característica desses sistemas é a presença comum de fungos, devido a sua grande diversidade externa. Estes organismos são importantes decompositores, que também podem ser fonte de alimento para outros organismos (FERREIRA, 2005).

Tendo em vista a situação de desconhecimento sobre esses sistemas e também a sua singularidade, é essencial pensar na sua conservação, tanto para a preservação das diversas relações ecológicas existentes apenas nestes ambientes, quanto para a manutenção destes ecossistemas únicos. Neste contexto, Ferreira, em 2004, desenvolveu um experimento de translocação de fauna, que pode fornecer indícios sobre uma possível alternativa para a conservação destes sistemas. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo descrever esse experimento que corresponde à translocação de uma comunidade de invertebrados de uma caverna ferruginosa

para uma galeria artificial, construída com a única finalidade de receber tal comunidade. Além disso, tal trabalho visou descrever as dinâmicas das populações após a translocação e também as observações realizadas ao longo dos monitoramentos, de forma a avaliar a eficiência desta ação de manejo.

2 METODOLOGIA

2.1 Histórico de translocações em cavernas

A única translocação de fauna cavernícola bem documentada ocorreu nos Estados Unidos na década de 70 (ELLIOTT, 1978). Em 1976 e 1977-78, sabia-se da existência de uma população de opiliões troglóbios (*Banksula melones*), habitante de apenas duas cavernas, uma delas estava ameaçada por assoreamento e a outra seria completamente submersa pelo enchimento do reservatório de *New Melones*. O grupo que realizava a construção do reservatório se responsabilizou pela realização de um projeto que tinha como intenção o salvamento desta espécie ameaçada. Durante a realização do projeto, as populações da caverna foram intensivamente coletadas por três meses e a comunidade composta por cerca de 30 espécies de artrópodes foi translocada para a mina de *Von Trump*. A mina foi previamente preparada com a deposição de solo e rochas da caverna e a colocação de troncos em decomposição coletados nas imediações do meio epígeo. O solo da caverna bem como os invertebrados foram trazidos em *containers* e depositados em locais mais altos, para evitar o efeito de cheias eventuais que poderiam comprometer o plano. Uma visita em 1979 revelou que a comunidade havia se estabelecido, embora os tamanhos populacionais de algumas espécies tivessem variado drasticamente. Em 1996, a espécie *Banksula melones* ainda encontrava-se presente na mina.

A translocação de fauna cavernícola deve ser considerada como uma técnica experimental, não devendo ainda ser considerada seriamente como uma solução eficiente para o problema de faunas cavernícolas ameaçadas. Mesmo com o aparente sucesso da translocação de *New Melones*, muitos problemas práticos foram apontados por Elliott (1978, 1981). Realizar translocações para outras ca-

vernas (naturais) pode acarretar três problemas:

1. Se a caverna receptora possui sua própria comunidade, e se não contém a espécie (ou grupo de espécies) ameaçada a ser translocada, surge a dúvida de se a caverna seria realmente adequada a receber tal espécie ameaçada;
2. Se for confirmado que a caverna receptora é efetivamente adequada à receptação da espécie ameaçada, esta deverá competir com as da comunidade original por recurso, o que pode comprometer o sucesso do plano;
3. Neste caso, não somente uma, mas duas comunidades cavernícolas poderiam ser destruídas.

Desta forma, deve-se obrigatoriamente utilizar-se de cavidades artificiais (minas subterrâneas) para eventuais propósitos de translocação. Além disso, tais cavidades receptoras devem ser previamente preparadas para receber as comunidades a serem transplantadas. Mais uma vez, enfatiza-se aqui que esta proposta deve ser encarada como experimental, assumindo-se os riscos inerentes a esta ação.

2.2 Justificativa para a realização do experimento

Uma das medidas determinadas pelo licenciamento de um empreendimento minerário estabelecido no município de Nova Lima (Minas Gerais) foi a execução do salvamento dos registros arqueológicos encontrados na gruta Capão Xavier II, uma vez que esta seria suprimida pela expansão da lavra de minério de ferro (Figura 1). Para tal, fazia-se necessária a realização de uma escavação que alteraria todo o piso da caverna. Tal alteração certamente geraria a total destruição de boa parte dos microhabitats ocupados pela maioria das espécies de invertebrados da caverna. Desta forma, foi proposto o presente experimento, tendo em vista

o quadro de grande impacto que seria estabelecido na cavidade após os termos dos trabalhos arqueológicos e, obviamente, a posterior supressão da cavidade.

A caverna de Capão Xavier II localiza-se no município de Nova Lima (Minas Gerais) e está inserida no Quadrilátero Ferrífero (Figura 2). Na Figura 3(a), pode-se observar a entrada da cavidade de Capão Xavier II e na Figura 3(b), o seu interior.

O objetivo deste experimento foi basicamente testar a eficiência da translocação de parte da comunidade de invertebrados de uma caverna ferruginosa para outra cavidade, construída exclusivamente com a finalidade de receber indivíduos provenientes da caverna original. Tal trabalho não teve como pretensão propor uma metodologia a ser implementada em casos de necessidade de supressão de cavidades. No entanto, dada a disponibilidade da empresa em financiar o experimento proposto, pareceu atrativa a possibilidade de executá-lo, principalmente pela quantidade e qualidade dos dados que se esperava obter.

A cavidade artificial foi idealizada partindo do conhecimento obtido durante a fase de caracterização ecológica das cavernas da área.

2.3 Escolha da área para a construção da cavidade

A cavidade artificial foi construída em uma área de fitofisionomia semelhante àquela encontrada na região do entorno da cavidade original. Além disso, as espécies vegetais existentes nas duas áreas são, em sua grande maioria, comuns.

A galeria artificial foi aberta próximo a um antigo local de prospecção mineral situado no morro ao lado daquele onde encontrava-se a gruta original. A entrada da galeria situa-se no interior de um capão de mata rodeado por vegetação predominantemente arbustiva típica de campos ferruginosos (canga). A cavidade artificial dista aproximadamente quinhentos metros do local onde existia a antiga

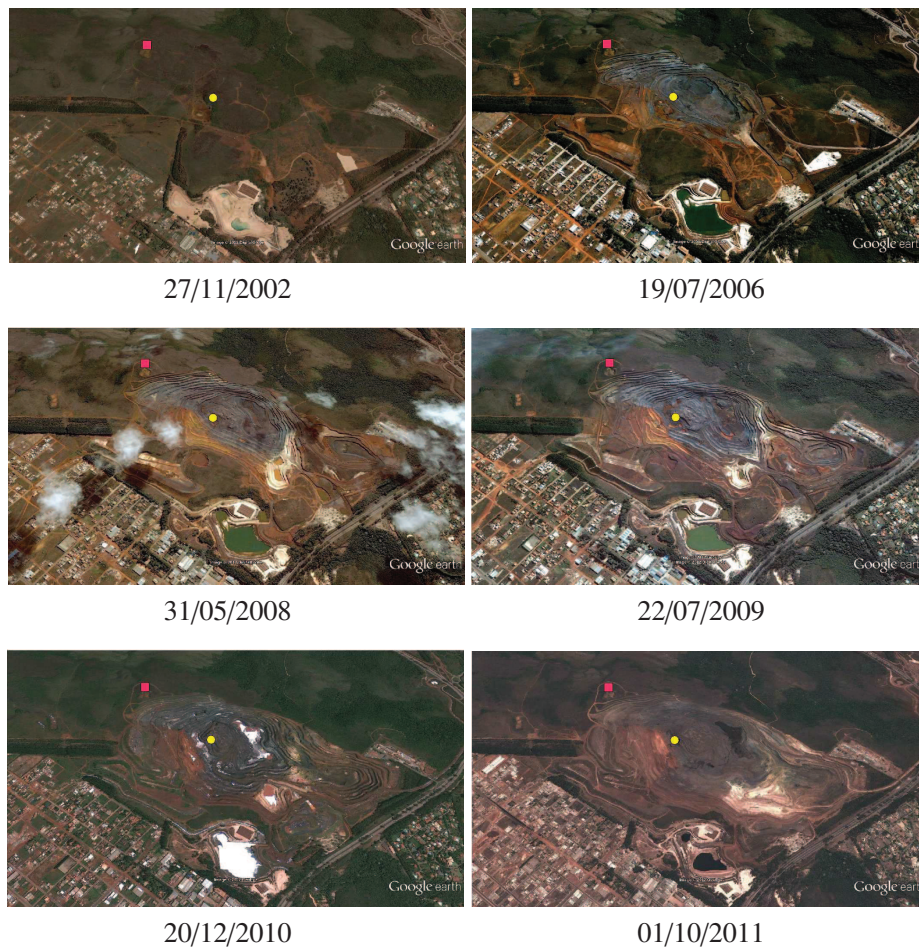


Figura 1 Expansão da lavra de minério de ferro. A caverna natural, Capão Xavier II, está representada por um círculo amarelo e a cavidade artificial, construída em 2004, por um quadrado vermelho. Destaca-se também o aumento da urbanização na região
Fonte: *Google Earth*

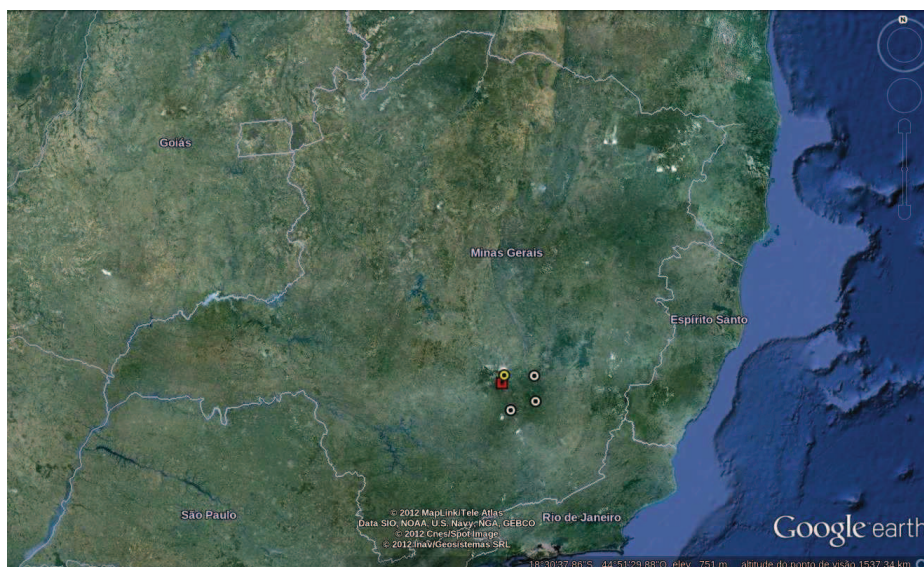


Figura 2 Localização da cavidade artificial representada pelo quadrado vermelho. Esta cavidade está inserida no Quadrilátero ferrífero, cujos vértices (Belo Horizonte, Santa Bárbara, Mariana e Congonhas) estão representados por círculos, destacando-se a cidade de Belo Horizonte representada em amarelo

Fonte: *Google Earth*



(a)



(b)

Figura 3 Caverna de Capão Xavier II localizada no município de Nova Lima, Minas Gerais. Em (a), está representada a entrada da cavidade e em (b), o seu interior

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

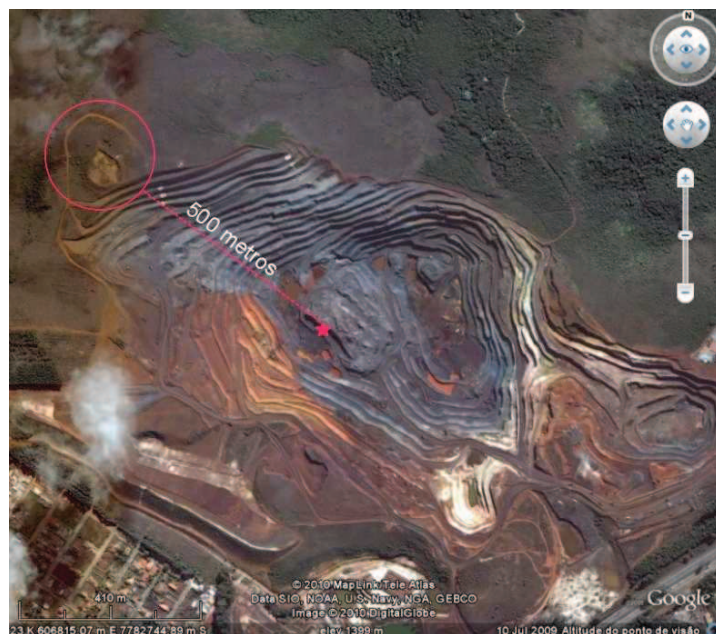


Figura 4 Mapa com a localização da cavidade Capão Xavier II representada por uma estrela. A região, na qual foi construída a cavidade artificial, é representada no interior do círculo vermelho. A distância entre as duas cavidades é de aproximadamente 500 metros
 Fonte: *Google Earth*

caverna que foi suprimida pela atividade de mineração (Figura 4).

2.4 Construção da cavidade

A cavidade artificial foi construída seguindo dois pressupostos básicos. O primeiro deles foi a tentativa de replicar da forma mais precisa possível a condição ecológica prevalente na cavidade original. O segundo foi a tentativa de construir a cavidade por meio da menor intervenção possível sobre o sistema epígeo do entorno imediato a ela. Ambos os pressupostos foram imprescindíveis ao planejamento prévio da arquitetura da galeria bem como da estratégia de construção. Uma vez que a fauna hipógea depende diretamente da vegetação externa como base tró-

fica (principalmente daquela presente no entorno imediato à entrada), qualquer alteração mais intensa no sistema epígeo do entorno imediato poderia comprometer o sucesso da ação. Desta forma, a cavidade foi construída conforme o detalhamento a seguir.

A vertente próxima ao antigo local de prospecção mineral foi escolhida para o início da abertura da galeria, tendo em vista o estado de alteração da vegetação externa (Figuras 5(a) e 5(b)). Uma vez que as obras necessárias à abertura da galeria exigiam maquinaria de grande porte, optou-se por abri-la por esta vertente em direção ao local que corresponderia à sua entrada. Tal atitude visou preservar a vegetação do capão de mata que contorna a entrada da galeria, que seria seriamente alterado caso se optasse pela abertura da galeria a partir de sua futura entrada.

O local inicial de abertura da galeria foi posteriormente fechado (como será detalhado à frente) de modo que a galeria possui apenas uma entrada, aquela associada ao capão de mata, o que garante uma maior estabilidade topoclimática à galeria.

Definido o local da abertura da galeria, fez-se o seu traçado partindo da direção estabelecida em superfície. Desta forma, o conduto da galeria artificial, de arquitetura predominantemente linear, foi determinado seguindo a direção do capão de mata, para que o túnel interceptasse a superfície na porção central deste capão.

Antes de iniciar a abertura da galeria, a antiga vertente, já erodida e alterada pela ação do tempo, foi regularizada por meio de um trator (Figuras 5(c) e 5(d)). Na nova vertente foram, então, iniciados os trabalhos de escavação da galeria (Figura 5(e)). Assim que o túnel atingiu poucos metros foi construída uma caixa de segurança que evitava eventuais desmoronamentos na vertente (Figuras 5(f) e 5(g)). A abertura do túnel se deu por meio de marteletes manuais. O mate-

rial removido era retirado da galeria por meio de carrinhos de condução manual. Os blocos de rocha foram separados para posteriormente serem utilizados como microhabitats no piso da cavidade, como será detalhado à frente. O conduto da galeria foi aberto em direção ascendente, até conectar-se à superfície no interior do capão de mata (Figura 5(h)).

Boa parte das cavidades naturais da área possui o conduto ascendente a partir da entrada, o que dificulta ou muitas vezes impede a entrada de águas de enxurradas para o interior destas cavidades. Desta forma, tais cavernas, em geral, não recebem enxurradas em nenhuma época do ano, mesmo nos períodos chuvosos. As águas de circulação consistem predominantemente de águas de percolação que infiltram através de espaços intersticiais e alcançam os condutos das cavernas.

A galeria artificial, entretanto, foi construída de forma a impactar minimamente o sistema epígeo, principalmente aquele associado ao entorno imediato da entrada. Para tal propósito, o conduto precisou ser descendente com relação à entrada (como anteriormente explicado), condição esta oposta à prevalente na maioria das cavernas da área. Desta forma, a topografia do piso da galeria contribuiria para a veiculação de águas de chuva para o interior da caverna. Esta condição é bastante distinta daquela à qual a comunidade de invertebrados translocada estava submetida em seu habitat prístino.

Sendo assim, era necessário gerar algum tipo de obstáculo que impedisse a entrada direta da água corrente para o interior da galeria durante os períodos chuvosos. Para tal foi construído um pequeno dique em toda a periferia da entrada (Figuras 6(a) e 6(b)). Como o piso externo é bastante aplainado, dificilmente grandes volumes de água seriam veiculados para o interior da galeria, pois a entrada não funciona como dreno. No entanto, para garantir um fluxo ainda menor, o dique foi construído utilizando materiais advindos da escavação da galeria. Tal di-

que possui reduzido tamanho, aproximadamente 20 cm de altura, e funciona como uma barreira sutil para as águas superficiais que poderiam penetrar na cavidade pela entrada.

Obviamente, a água penetrará na cavidade por percolação, predominantemente nos períodos chuvosos. Tal água poderia ficar estancada na porção final da galeria, mais rebaixada topograficamente, próxima ao local onde o túnel foi fechado. No entanto, como será detalhado adiante, foi construído um dreno (Figuras 6(c), 6(d) e 6(e)) durante o fechamento da porção final da galeria para evitar uma eventual estanqueidade das águas que atingirem a galeria.

Ao final da construção do túnel principal, foram feitas reentrâncias no piso do conduto para o escoamento da água nos períodos chuvosos (Figura 6(f)). Nesse momento, também foi realizada uma topografia bastante detalhada da cavidade artificial.

Terminada a construção da galeria, foi realizado o fechamento da porção que corresponde ao final do conduto. Tal fechamento se fez necessário tendo em vista a necessidade de criação de um topoclima mais estável no interior da galeria. Se a cavidade fosse mantida com duas entradas, seria criado um túnel de vento que alteraria constantemente a atmosfera da cavidade, impossibilitando sua estabilização. Além disso, como a galeria possui o conduto retilíneo, praticamente toda sua extensão ficaria exposta à luz indireta que refletiria a partir da entrada. Desta forma, foram colocadas três chapas de aço a cerca de cinco metros da entrada dispostas alternadamente (Figura 6(g)). Tais chapas impedem a passagem direta da luz refletida da entrada, fazendo com que boa parte da galeria, mesmo retilínea seja afótica.

Como a entrada “real” é mais elevada com relação ao piso da cavidade, como já explicitado, foi necessário instalar um dreno para o escoamento das águas

que penetrarão na cavidade nos períodos chuvosos. Caso o dreno não fosse construído, existiria o risco de estancamento de água na porção final do conduto da galeria, o que poderia levar à submersão de microhabitats importantes e à morte de muitos invertebrados. Além disso, esta eventual coleção de água acumulada poderia, em algum momento, levar ao rompimento da porção final da galeria, o que comprometeria toda a estabilidade topoclimática e, conseqüentemente, todo o experimento.

O dreno foi construído através da colocação de camadas alternadas de areia e brita de diferentes granulometrias. Tais camadas foram posteriormente envolvidas em uma malha mineral semi-permeável (bidim) que permite a passagem da água e retém partículas maiores, evitando, assim, a lixiviação de materiais clásticos mais refinados o que poderia levar à erosão da porção final da galeria e sua consequente abertura. Após a construção do dreno, a porção final da galeria foi fechada através da colocação de sedimento que foi retirado durante a abertura da galeria. Tal procedimento foi feito com um trator. Todo este material foi posteriormente compactado tanto na porção epígea quanto no interior da galeria. Toda a vertente externa foi revegetada através do plantio de espécies nativas da área (fornecidas pelo viveiro de mudas da MBR).

O perfil da cavidade, gerado a partir da sua topografia, é apresentado na Figura 7. Nele, percebe-se claramente a situação descendente do conduto com relação à entrada e a porção final do conduto que corresponde ao local do início da construção da galeria e que foi posteriormente fechada. A planta baixa da mesma é apresentada na Figura 8.

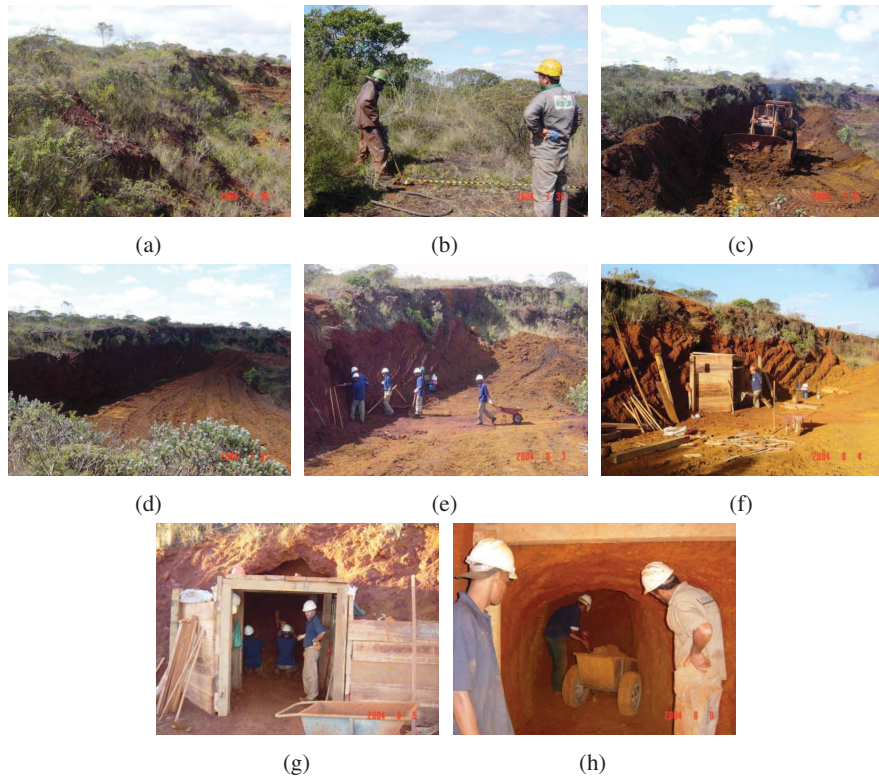


Figura 5 Principais etapas da construção da cavidade artificial. Área, na qual a galeria foi construída (a) e (b). Inicialmente, o local foi limpo e regularizado por meio de um trator (c) e (d), e em seguida, as escavações foram iniciadas (e). Caixa de segurança para evitar eventuais desmoronamentos (f) e (g). Em (h), é representada parte da cavidade com os operários realizando as escavações

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira



Figura 6 Principais etapas da construção da cavidade artificial. (a) e dique (b). Em (c) e (d) está representada a construção do dreno na porção final da cavidade, que posteriormente foi fechada (e). Reentrâncias feitas no piso do conduto (f) e chapas de aço dispostas ao longo da cavidade (g)
Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

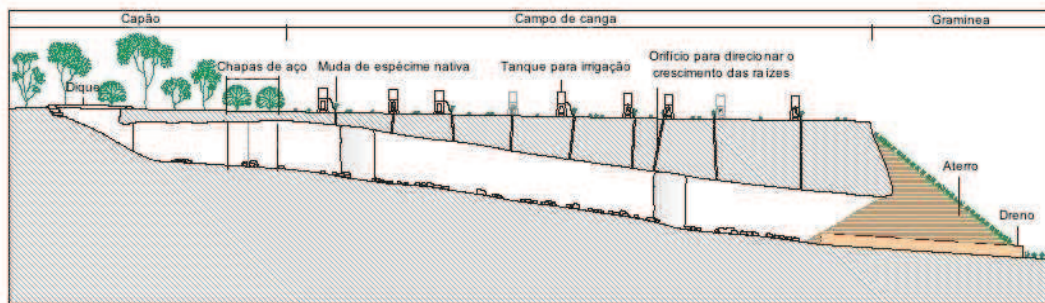
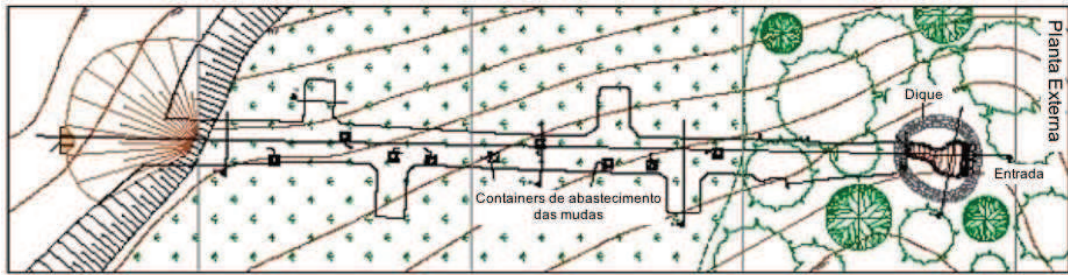


Figura 7 Perfil externo da cavidade artificial



(a)



(b)

Figura 8 Plantas baixas da cavidade artificial: planta externa (a) e interna (b)

2.5 Preparação da cavidade

2.5.1 Fornecimento de microhabitats

A galeria artificial foi aberta de forma retilínea, possuindo quatro reentrâncias de cerca de 2,5 metros em diferentes pontos do conduto. No entanto, a abertura do espaço foi feita de forma bastante regular, de modo que foi necessário realizar algumas intervenções que pudessem promover uma maior irregularidade topográfica na galeria. Tais irregularidades funcionariam como microhabitats para diferentes grupos de organismos.

Sendo assim, foram construídas diversas cavidades de diferentes tamanhos, formas e profundidades ao longo do conduto da cavidade. Tais cavitações foram feitas, principalmente, por meio de um martetele manual (Figura 9(a)).

Além disso, foram colocados, no interior do conduto, vários fragmentos de rocha apoiados diretamente sobre o piso, que também funcionariam como abrigo para a fauna (Figura 9(b)). Tais fragmentos foram aqueles retirados durante a abertura da cavidade. Como estas rochas permaneceram alguns dias expostas no meio externo, cada rocha foi lavada e escovada antes de ser depositada no interior da galeria. Tal ação objetivou remover quaisquer invertebrados que pudessem ter colonizado estas rochas quando de sua permanência no sistema epígeo. Esta limpeza evitou a introdução de espécies epígeas no interior da galeria, espécies estas que poderiam comprometer o experimento. As rochas já lavadas foram levadas para o interior da cavidade e posteriormente dispostas em diferentes locais no piso, fornecendo assim, abrigos para a fauna a ser translocada.

2.5.2 Fornecimento de recursos tróficos

Uma vez que a galeria artificial foi aberta em um local onde não existiam macro espaços subterrâneos, assumiu-se que os recursos tróficos seriam virtual-



Figura 9 Criação de microhabitats na galeria artificial (a). Também foram inseridos na galeria diversos fragmentos de rocha, que funcionariam como abrigo para a fauna (b)

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

mente inexistentes neste novo espaço. Desta forma, foi necessário preparar previamente a cavidade para que ela fosse capaz de fornecer recursos alimentares para a fauna a ser translocada. Tal fornecimento foi baseado em duas premissas. A primeira era a necessidade de uma disponibilização imediata de recursos alimentares que pudessem ser prontamente consumidos pelos organismos translocados logo após seu estabelecimento no novo habitat. A segunda era a necessidade de criação de condições para o estabelecimento de uma base trófica duradoura que permaneceria na cavidade sem a necessidade de contínuas intervenções. Esta última seria, obviamente, estabelecida de médio a longo prazo.

Para a disponibilização imediata de recursos alimentares para a fauna, foram introduzidos no interior da galeria, dois tipos de recursos: de origem animal e de origem vegetal. Os recursos de origem animal consistiram de ração para peixes, em flocos e em *pellets*, que foram depositados em diferentes locais ao longo da galeria. Embora a constituição destas rações (peixes, camarões) seja pouco convencional enquanto alimentos para fauna cavernícola, existe uma grande quan-

tidade de proteínas nestes materiais que certamente facilitariam e acelerariam o estabelecimento de fungos no interior da cavidade. Estes últimos são prontamente consumidos por várias espécies que seriam translocadas. Além disso, como a maioria das espécies cavernícolas é detritívora, em sua maioria generalistas, estas rações poderiam também ser diretamente consumidas pelos invertebrados. Os flocos e *pellets* eram umedecidos assim que colocados no interior da galeria. Poucos dias após a colocação destes materiais era visível a quantidade de fungos que se desenvolviam sobre eles (Figura 10(a)).

Além da matéria orgânica animal, foi fornecida matéria orgânica vegetal. Para tal, foram coletados fragmentos de troncos e galhos presentes na área externa à galeria que já se apresentavam em diferentes estágios de decomposição. Uma vez que já existia uma fauna associada a estes materiais, foi realizado o “cozimento” dos mesmos. Tais fragmentos foram colocados em água fervente e esta ação objetivou “esterilizar” estes materiais (os invertebrados associados foram mortos pelo calor) e também umedecer a madeira, que encontrava-se bastante ressequida. Após esterilizados e umedecidos, os fragmentos foram colocados em diferentes pontos no interior da cavidade (Figura 10(b)).

Tais medidas tiveram como objetivo fornecer primariamente recursos para o estabelecimento inicial da comunidade. Entretanto, tais recursos, ditos efêmeros, certamente se esgotariam em um determinado momento. Desta forma, era necessário fornecer outro tipo de recurso que pudesse se estabelecer na cavidade.

A base trófica da maioria das cavernas da área compõe-se de raízes de plantas da vegetação externa que crescem alcançando a galeria das cavernas (Figuras 11(a) e 11(b)). Sendo assim, era fundamental criar condições para o estabelecimento de raízes na galeria artificial, para que estas pudessem estabelecer uma base trófica permanente, de médio a longo prazo, para a comunidade translocada.



Figura 10 Recursos tróficos efêmeros que foram inseridos na galeria para estabelecimento inicial da comunidade. Esses recursos foram a ração para peixe (a), que posteriormente foi colonizada por fungos (a), e fragmentos de troncos de árvores em diferentes estágios de decomposição (b)

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

Para esta finalidade foi elaborada uma estratégia de transposição de espécies vegetais para a superfície da galeria e a consequente indução do crescimento radicular destas espécies transplantadas (Figura 12). Para tal, foi inicialmente realizada a perfuração da superfície correspondente ao traçado interno da galeria. Por meio de uma perfuratriz mecânica, foram criados 10 orifícios que conectavam o meio epígeo ao teto da galeria.

Posteriormente, foram trazidas 10 mudas de espécies nativas da região (*Tibouchina granulosa*, *Clusia arrudae* e *Cupania vernalis*) retiradas do viveiro de mudas da empresa de mineração. Tais espécies foram escolhidas por serem bastante representativas na área externa da gruta do Capão Xavier II e da galeria artificial e por possuírem raízes pivotantes ou axiais. Cada muda foi plantada em um orifício. O eixo central da raiz foi introduzido no orifício e os ramos radiculares laterais foram espalhados no seu entorno. Uma vez que era necessário induzir o



Figura 11 Raízes da vegetação externa que são comuns como base trófica de cavernas ferruginosas nessa região. Em (a) e (b) está representado o piso de cavidades com acúmulo de raízes
 Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

crescimento axial da raiz, foi introduzida uma mangueira plástica na porção inicial de cada orifício. Tal mangueira era conectada a um *container*, contendo água, na qual foram dissolvidos micronutrientes e hormônios de crescimento radicular. O gotejamento era controlado por um pequeno registro metálico. A base de cada muda foi recoberta com solo e superficialmente coberta com uma lona, que evitava a dessecação excessiva do solo. Cada *container* era continuamente recarregado com água. Tais aparatos foram mantidos até o início da estação chuvosa na área.

2.6 Translocação da fauna subterrânea

Depois de preparada a cavidade receptora, foi realizada a translocação da comunidade da gruta Capão Xavier II. Para garantir o estabelecimento das populações de algumas espécies, foram capturados também alguns indivíduos na gruta do Capão Xavier I e na galeria do Capão Xavier.

A translocação foi realizada em duas fases, sendo a primeira realizada



Figura 12 Representação de um dos dez sistemas que foram desenvolvidos para transplante de mudas de espécies de plantas nativas e representativas da vegetação externa de Capão Xavier II e da galeria artificial
Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

antes do início das escavações arqueológicas na gruta (oito visitas) e a segunda após o início das escavações (seis visitas).

A primeira fase consistiu de oito visitas às cavernas (sete delas à gruta do Capão Xavier II e uma à gruta Capão Xavier I e galeria do Capão Xavier). As seis primeiras coletas foram sequenciais e na semana seguinte, foram realizadas mais duas visitas. O objetivo de tais visitas foi coletar o maior número possível de invertebrados.

Os invertebrados foram coletados com o auxílio de pinças e sugadores, evitando-se ao máximo o contato excessivo com cada indivíduo para minimizar o estresse (para mais detalhes sobre o efeito do estresse nas etapas de programas de translocação, consultar Dickens, Delehanty e Romero (2010) e Teixeira et al. (2007)). Todos os indivíduos encontrados em cada visita foram acondicionados em vasilhames fechados para garantir a umidade. Cada espécie foi colocada em

um vasilhame, evitando-se, ao máximo, contato de espécies diferentes em cada vasilhame, principalmente detritívoras e predadoras, pois uma vez que o espaço era restrito, poderia ocorrer uma intensificação de predação ou mesmo canibalismo.

Ao final do primeiro dia de captura foram colocadas iscas de atração de detritívoros, *pellets* de ração animal, em diferentes pontos da caverna. Tal ação visou atrair indivíduos presentes em compartimentos intersticiais e tornar possível sua coleta nos dias subsequentes da translocação.

Os *containers* maiores utilizados para o transporte da fauna foram previamente preparados para garantir a manutenção da umidade durante a permanência dos indivíduos em seu interior. Durante cada dia de translocação, coletava-se uma série de organismos até que todos os *containers* disponíveis contivessem indivíduos. Neste momento, os *containers* eram então transportados para a galeria artificial, sendo os invertebrados liberados. Durante a coleta, foram contabilizados quantos indivíduos de cada espécie foram capturados em cada dia e em cada cavidade.

As diferentes populações foram transportadas para o novo hábitat e realocadas obedecendo o seu antigo padrão de distribuição. Para tal, foi anotada a posição de cada indivíduo na planta da cavidade no momento da coleta durante a ação de translocação. Tal anotação permitiu a detecção da distribuição original de cada população no momento da captura, garantindo a reprodução da distribuição de cada população no novo hábitat.

Foram translocadas 57 espécies de invertebrados. Destas, dezoito foram consideradas de elevado potencial ao estabelecimento na cavidade dado o número de indivíduos translocados. Vinte e quatro espécies foram consideradas como de baixa viabilidade de estabelecimento (embora esta possa vir a ocorrer) e quinze espécies foram consideradas como de estabelecimento inviável via translocação,

pois somente um indivíduo foi translocado. No entanto, como as populações cavernícolas são, em geral, reduzidas, mesmo as espécies que tiveram poucos representantes translocados podem, eventualmente, se estabelecer no novo habitat. Contudo, espécies, das quais apenas um indivíduo foi translocado, dificilmente se estabelecerão na cavidade, a menos que exista colonização ativa posterior feita por outros indivíduos.

Ressalta-se aqui que, embora as espécies que tiveram um número muito reduzido de exemplares translocados tenham baixa propensão ao estabelecimento na cavidade artificial, sua simples presença neste novo habitat pode eventualmente levar à atratividade de outros indivíduos para a galeria. A emissão de feromônios, por exemplo, poderia atrair indivíduos provenientes de outros habitats (lapidícolas, intersticiais, entre outros) para o interior da galeria. Desta forma, embora a expectativa inicial seja a de baixa viabilidade de instalação destas espécies, não foi descartada totalmente a possibilidade de que populações viessem a se estabelecer na cavidade. Além disso, sendo a galeria um novo habitat recentemente aberto, muitas espécies certamente a colonizariam, o que poderia levar ao estabelecimento de médio a longo prazo de outras espécies, diferentes daquelas translocadas, o que, de fato, ocorreu, como será mencionado posteriormente.

Ressalta-se, também, que boa parte das espécies de baixa viabilidade de instalação, devido ao número reduzido de indivíduos translocados, é para-epígea ou acidental. Desta forma, embora existisse a possibilidade elevada da não instalação inicial destas espécies, existia também a possibilidade de recolonizações futuras que culminassem com o estabelecimento posterior de suas populações na galeria artificial.

As espécies de formigas não foram translocadas para a cavidade receptora. Acredita-se que tais espécies invasoras causassem impactos sobre a gruta do Capão

Xavier II, por consumo exacerbado de recursos orgânicos.

A ação de translocação proposta apresentou, como já mencionado, o objetivo de testar a eficiência da translocação da comunidade de uma caverna natural para uma cavidade artificial, no que concerne à manutenção desta comunidade frente à necessidade de supressão de uma cavidade. Considera-se, desta forma, que o presente estudo contribua intensamente para a compreensão dos efeitos da realocação de uma comunidade em um sistema subterrâneo artificial.

2.7 Monitoramento

2.7.1 Proposta inicial da ação de monitoramento pós-soltura

Visitas mensais foram realizadas à cavidade, visando observar a fauna presente bem como o desenvolvimento radicular das plantas transplantadas. Uma vez que a frequência de visitas foi relativamente alta, foram planejadas inspeções diferenciadas que visaram minimizar o impacto do monitoramento sobre a comunidade.

Mensalmente, foi realizada somente uma inspeção superficial da cavidade, sem a inspeção detalhada dos microhabitats. Tal procedimento visou reduzir o impacto sobre algumas populações de invertebrados de pequeno porte recém estabelecidas na cavidade. Caso todos os microhabitats fossem mensalmente inspecionados, existiria o risco de certas populações migrarem da cavidade devido ao constante estresse.

As inspeções mais detalhadas foram realizadas trimestralmente. Nestas visitas, todos os microhabitats eram cautelosamente inspecionados para averiguação da presença e estado das diferentes populações.

Em cada visita de monitoramento, era anotada a posição de cada indivíduo observado na cavidade. Tal mapeamento forneceu dados de abundância e distribui-

ção espacial de cada população que habitava a cavidade. Foram medidas, ainda, a temperatura e umidade do ar em cada visita à galeria, no intuito de se caracterizar o topoclima da cavidade.

3 RESULTADOS

3.1 O meio externo à cavidade

O meio externo à cavidade foi revegetado, em especial na porção final da galeria, fechada após a escavação da mesma, tendo em vista que as chuvas pudessem vir a erodir esta área, levando à abertura da galeria. Gramíneas foram plantadas nas vertentes da porção próxima ao barranco, evitando, assim, a remoção de sedimentos por enxurradas. Outras plantas herbáceas foram progressivamente se estabelecendo na área, garantindo a manutenção da galeria e sua respectiva condição de confinamento (Figura 6(e)).

3.2 Espécies vegetais transplantadas

Foram transplantadas, antes da translocação da fauna, dez mudas pertencentes a três espécies: *Tibouchina granulosa*, *Clusia arrudae* e *Cupania vernalis*. Tais mudas foram plantadas sobre cada orifício que conectava o meio epígeo ao interior da cavidade. Cada espécie respondeu de forma diferenciada ao plantio. A espécie que mostrou maior resistência às condições vigentes na área foi *C. arrudae*. A espécie menos resistente foi *C. vernalis*, cujos indivíduos não resistiram e morreram aproximadamente quatro meses após o plantio.

Em Março de 2005, seis mudas foram arrancadas da área do experimento por vândalos. Nos respectivos locais, onde anteriormente estavam as mudas, foram plantadas, em 23 de Abril, novas mudas, sendo uma de *C. arrudae* e quatro de *T. granulosa*.

Nos meses seguintes, os indivíduos de *T. granulosa* foram gradativamente esmorecendo até morrerem ao final do período seco. Os indivíduos de *C. arrudae* resistiram bem a este período. Em Dezembro de 2005, novas mudas foram plan-

tadas no local das que morreram. Foram utilizadas, neste último plantio, somente mudas de *C. arrudae*. Tal decisão baseou-se em dois fatos: além desta espécie ter sido a que melhor respondeu às condições físicas vigentes na área, foi constatado, durante os inventários de fauna em cavernas presentes no Parque Estadual do Rola Moça e da Serra da Moeda Sul, que a maior parte das raízes que crescem em profusão em cavernas superficiais provém de grandes árvores de *C. arrudae*. Tal fato foi observado em cavernas cujas únicas árvores externas consistiam desta espécie. Essas árvores lançavam suas raízes nos espaços subterrâneos, interceptando as galerias das cavernas.

As raízes da vegetação externa passaram a se desenvolver no teto da galeria artificial logo após sua escavação. Embora estas não fossem ainda as raízes que tiveram seu crescimento estimulado, a simples interceptação das raízes pela construção da galeria, já promoveu seu estabelecimento na nova cavidade.

As porções das plantas próximas aos canos plásticos, que levavam água e solução de micronutrientes, mostraram-se mais desenvolvidas no início do experimento, como era previsto. Alguns invertebrados, nesse momento, já se aproximavam dos tufos radiculares, indicando um provável consumo de restos radiculares. Quando as mudas morriam, as mesmas eram arrancadas e, na maioria dos casos, o estabelecimento de colônias de cupins era o principal causador do falecimento das plantas. Desta forma, acredita-se que as espécies transplantadas não resistiram em função do consumo de suas raízes por isópteros.

As raízes visíveis no interior da galeria (*T. granulosa*) que tiveram seu crescimento estimulado também se mostraram em desenvolvimento durante os primeiros meses, após os quais passaram a ressecar até o falecimento do indivíduo. Entretanto, raízes de espécies colonizadoras passaram a se desenvolver, acessando a galeria a partir de Abril de 2006. Algumas destas raízes também se deterioraram

após o falecimento das respectivas plantas. Outras, no entanto, se estabeleceram na galeria, permitindo o posterior estabelecimento de espécies fitófagas, como Cíxiidos encontrados durante a última visita à galeria, realizada em Outubro de 2009.

3.3 O ambiente físico da galeria (topoclima)

A umidade foi o parâmetro de maior variação, embora tal variação tenha sido de pequena amplitude (valor mínimo de 76,00%, observado em 21 de Agosto de 2005, e valor máximo de 98,00%, registrado em 23 de Dezembro de 2004 e 18 de Março de 2006). Seu valor médio, ao longo de todo monitoramento, foi de 88,40 %. Os maiores valores de umidade ocorreram durante as estações chuvosas, período, no qual a cavidade se tornava bastante umedecida. Durante as fortes chuvas que ocorreram na área, um considerável volume de água adentrava na cavidade pela entrada, fato pouco comum em outras cavernas da região, que possuem conduto ascendente a partir da entrada. Esta água permanecia estocada em poças que se formavam no piso da galeria, nos locais mais rebaixados topograficamente. Tais poças permaneciam em contato e constante circulação de água, dada a inclinação do piso da galeria. Esta água acumulada acabou por atrair espécies aquáticas, que apareceram na cavidade somente quando estas poças se formavam. Desta forma, um novo habitat se formou na galeria artificial, habitat este prontamente colonizado por espécies aquáticas. Nos períodos secos, as poças desapareceram e os substratos da cavidade sofreram considerável dessecação, não chegando, entretanto, a ficarem totalmente ressecados.

A temperatura mostrou-se bastante estável durante todo o monitoramento. Seu valor médio, ao longo dos monitoramento, foi de 19,70 °C. A temperatura sofreu uma leve redução durante os períodos mais secos, coincidentes com o inverno na área, o que demonstra que a elevada superficialidade da galeria acaba por

aumentar sua exposição às variações climáticas externas. Entretanto, a amplitude térmica observada é relativamente suave, aparentemente não tendo influenciado a comunidade associada à galeria. Tal conclusão foi baseada em um teste de regressão linear simples entre riqueza de espécies e temperatura no interior da galeria. Tal teste não revelou quaisquer relações significativas entre estas variáveis.

O dreno construído ao final da cavidade mostrou-se bastante eficiente durante os dois primeiros anos do monitoramento, permitindo o rápido escoamento do excesso de água que poderia se acumular na porção final da galeria. Entretanto, na última visita, em Outubro de 2009, foi observada uma grande poça, ao final do conduto, de dimensão muito superior àquelas que se formavam nos períodos chuvosos que ocorreram logo após a construção da cavidade. Acredita-se que o dreno estivesse repleto de sedimentos de granulometria refinada, o que pode ter comprometido, com o tempo, sua capacidade de drenar água de forma eficiente.

3.4 Importação biológica de nutrientes para a galeria

Além dos recursos tróficos inicialmente introduzidos na cavidade, antes da translocação da fauna, outros recursos alimentares passaram a ser importados para o interior da galeria. Um recurso bastante introduzido na cavidade, embora pouco disseminado pelo sistema, foram restos vegetais transportados pelo vento para o interior da galeria. Tais restos consistiam basicamente de folhas e pequenos galhos, que caíam junto à entrada. Nos períodos chuvosos, a pequena enxurrada, que se formava junto à entrada, transportava parte deste material para as porções mais internas da galeria. Entretanto, devido a existência de placas metálicas instaladas para impedir que a luz atingisse as porções mais profundas da galeria, tais materiais orgânicos foram aprisionados por estas barreiras físicas. Dessa maneira, esses materiais não eram disseminados até as regiões mais profundas da cavidade,

o que poderia levar a uma “eutrofização” do sistema.

Além deste transporte físico de materiais orgânicos, houve também a veiculação biológica destes materiais, em especial fezes de animais que frequentavam a galeria, mas que dela deviam sair para se alimentar. Este é o caso de todas as espécies de vertebrados encontradas. Pequenas fezes de morcegos foram observadas em diversos pontos no interior da cavidade. Como os morcegos que se estabeleceram não foram agregações espacialmente restritas, não existia a formação de um único depósito de fezes (guano) destes organismos. Entretanto, esta maior disseminação das fezes pela cavidade é mais interessante que a formação de uma única mancha espacialmente restrita, na qual o recurso se acumularia. Fezes disseminadas são mais facilmente acessadas por espécies de pequeno porte, que mantêm uma distribuição mais ampla pela cavidade. Além disso, caso os morcegos exibissem um comportamento de formação de agregações espacialmente restritas que levasse à produção de uma única mancha de guano, as possibilidades de perda deste recurso seriam maiores. Por exemplo, caso a mancha fosse depositada em uma depressão no piso da galeria, assim que se iniciasse o período chuvoso todo este recurso seria lixiviado de uma só vez da cavidade.

Além das fezes de morcegos, foram também observadas fezes de um mamífero, provavelmente *Sylvilagus brasiliensis*, no interior da cavidade em Dezembro de 2005. Tais fezes foram depositadas na porção afótica da galeria, após as placas metálicas, em uma das laterais que se irradiam do conduto principal. Durante a inspeção, observou-se que invertebrados detritívoros já tinham iniciado o processo de colonização da mancha, sendo que alguns já estavam se alimentando das fezes.

3.5 Oscilação temporal da comunidade (extinções e colonizações)

Consideraram-se como espécies estabelecidas na cavidade aquelas cujos indivíduos foram observados em pelo menos um terço das visitas realizadas (25 visitas, contabilizando a última, realizada em 22 de Outubro de 2009). Deste modo, espécies que foram observadas em pelo menos 9 visitas à galeria foram consideradas estabelecidas até o último monitoramento.

Das 18 espécies translocadas consideradas de estabelecimento viável via translocação, 10 se estabeleceram, ou seja, foram avistadas em pelo menos nove visitas. No entanto, outras 5 espécies foram avistadas esporadicamente na galeria durante este período, podendo, ainda, vir a se estabelecer. Desta forma, das 18 espécies, somente 3 não foram mais avistadas desde o final da translocação, *Eukoenenia sp* – Palpigradi, uma aranha e um homóptero – Orthezidae. Destas 3 espécies, já era esperado o não estabelecimento da última, junto a outra espécie de homóptero – Cixiidae sp1, uma vez que a mesma é fitófaga. Como ainda não havia recursos alimentares (raízes) na galeria, já era esperado o não estabelecimento de ambas as espécies previamente citadas. No entanto, na última visita realizada em Outubro de 2009, cíxiidos foram observados na galeria, já se alimentando das raízes em crescimento na cavidade.

Das 24 espécies consideradas de baixa viabilidade de estabelecimento via translocação, 4 se estabeleceram (Paradoxosomatidae sp1 - 4 indivíduos translocados, Pselaphinae sp1 - 3 indivíduos translocados, Gonyleptidae sp1 - 7 indivíduos translocados e *Plato sp.* - 2 indivíduos translocados). Destas espécies, a aranha *Plato sp.* merece destaque. Os dois únicos indivíduos translocados eram fêmeas “grávidas”, que foram responsáveis pela ampla colonização da galeria nos meses subsequentes à translocação. Um fato que foi inicialmente preocupante com relação às populações estabelecidas destas quatro espécies dizia respeito ao potencial

problema genético oriundo da baixa variabilidade, uma vez que tais populações foram fundadas a partir de um número muito reduzido de indivíduos. No entanto, o acompanhamento das populações ao longo do tempo revelou que as mesmas se estabeleceram. No caso das aranhas *Plato sp.* e dos opiliões Gonyleptidae sp1, ambas as populações sofreram uma redução em abundância no segundo ano do monitoramento, mas passaram a crescer ao final do segundo ano. As populações destas duas espécies apresentaram-se aparentemente em crescimento no último monitoramento. Já no caso dos Paradoxosomatidae sp1. e dos coleópteros Pselaphinae sp1, ambas as populações apresentaram oscilações em abundância ao longo do tempo, mas aparentemente mostraram-se estabilizadas.

Como era de se esperar, das 15 espécies consideradas como de estabelecimento inviável via translocação, nenhuma se estabeleceu. A presença de um único indivíduo de cada uma destas espécies não foi suficiente para a atração de outros espécimes para a cavidade. Além disso, muitas destas espécies compreendiam grupos para-epígeos, edafobiontes ou mesmo “acidentais”, cujos habitats preferenciais eram eventualmente distintos da caverna em si. Desta forma, era de se esperar seu não estabelecimento, tendo em vista que sua presença durante a translocação poderia ser uma eventualidade.

Um fato esperado, mas que superou as expectativas, consistiu na intensa colonização de espécies no interior da galeria. Durante as visitas à cavidade, foram observadas 79 espécies que não foram translocadas, isto é, que colonizaram ativamente a galeria artificial, via entrada ou via canalículos. Destas 79 espécies, 72 compreendiam invertebrados e 7 compreendiam vertebrados (*Anura sp1*, Hyllidae sp1, *Hylla sp1*, Phyllostomidae sp1, *Glossophaga sp*, Colubridae sp1 e *Coragyps atratus*). Além disso, foram avistadas fezes de um mamífero, provavelmente *Sylvilagus brasiliensis*, que visitou a cavidade.

Das 79 espécies que colonizaram ativamente a galeria, 9 se estabeleceram, sendo 7 invertebrados (*Pselaphinae* sp1, *Formicidae* sp., *Chelodesmidae* sp., *Polydesmida* sp., *Arrhopalites* sp., *Conicera* sp. e *Gastropoda* sp.) e 2 vertebrados (*Hylla* sp. e *Glossophaga* sp.).

Desta forma, a partir do último monitoramento, existiam 23 espécies estabelecidas na cavidade, número superior ao esperado via translocação (18 espécies), o que já revela um resultado satisfatório. Além disso, ao quantificar todas as espécies que já visitaram a galeria, dentre as translocadas e as que a colonizaram ativamente, tem-se um total de 136 espécies, número bem superior ao encontrado nos inventários da gruta Capão Xavier II.

Das 57 espécies inicialmente translocadas, 26 não foram mais avistadas desde a translocação. Deste modo, pode-se afirmar que existem cerca de 87 espécies que transitam entre a galeria artificial e outros compartimentos, sejam eles o meio epígeo ou mesmo meios hipógeos adjacentes (espaços intersticiais e canalículos da canga). Este número (87 espécies) corresponde ao número total de espécies observadas, incluindo as translocadas, subtraído do número de espécies translocadas e nunca observadas na cavidade e o número de espécies consideradas estabelecidas.

O grande número de espécies (110 espécies, considerando as efetivamente estabelecidas e as espécies consideradas “eventuais”) presente na galeria em relação à antiga gruta Capão Xavier II merece destaque, principalmente quando se comparam as diferentes dimensões de ambas as cavidades, a galeria é bem menor do que a caverna natural. Esta riqueza pode advir do amadurecimento da comunidade da galeria que, durante os momentos iniciais, após a translocação, passou por fortes oscilações com colonizações e extinções frequentes. Alternativamente, a elevada superficialidade da cavidade leva a grandes conexões com uma vasta rede

de canalículos da canga, o que pode permitir maior intercâmbio de espécies, que utilizam vários compartimentos subterrâneos, dentre os quais a galeria artificial.

Outro fato que merece menção é a alta “rotatividade” de espécies no interior da galeria artificial. Das 87 espécies que transitam pela galeria, 45 foram avistadas somente uma vez durante todos os monitoramentos. Tal fato reforça as duas idéias apresentadas no parágrafo anterior, amadurecimento da comunidade associada à galeria e grande intercâmbio de espécies entre a galeria e outros compartimentos subterrâneos.

A Figura 13 ilustra os valores de riqueza de espécies durante os monitoramentos. É perceptível a oscilação dos valores de riqueza nos primeiros 7 meses, nos quais foi observada uma maior riqueza, coincidindo com os meses de vistorias mais detalhadas. Nestas vistorias, eram reveladas muitas espécies “transitórias” que se estabeleciam preferencialmente em microhabitats, mas que possuíam dinâmicas bastante efêmeras na cavidade. Percebe-se, a partir do oitavo mês de monitoramento, uma tendência à estabilização dos valores de riqueza, o que indica a extinção local de muitas espécies que colonizaram a galeria nos momentos iniciais, mas que não se estabeleceram. Alternativamente, tais espécies podem não terem sido extintas, mas estarem preferencialmente associadas aos canalículos, sendo observadas, apenas casualmente, em eventuais incursões à macrocavidade.

Contrariamente, a estabilização dos valores de riqueza pode indicar um eventual amadurecimento da comunidade estabelecida na galeria, no qual as espécies efetivamente estabelecidas tendem a contribuir de forma mais efetiva para a riqueza da cavidade.

Os padrões de oscilação populacional mostraram consideráveis variações entre as diferentes espécies. Nesse trabalho, foram considerados os padrões temporais de oscilação populacional somente das espécies estabelecidas, ou seja, aque-

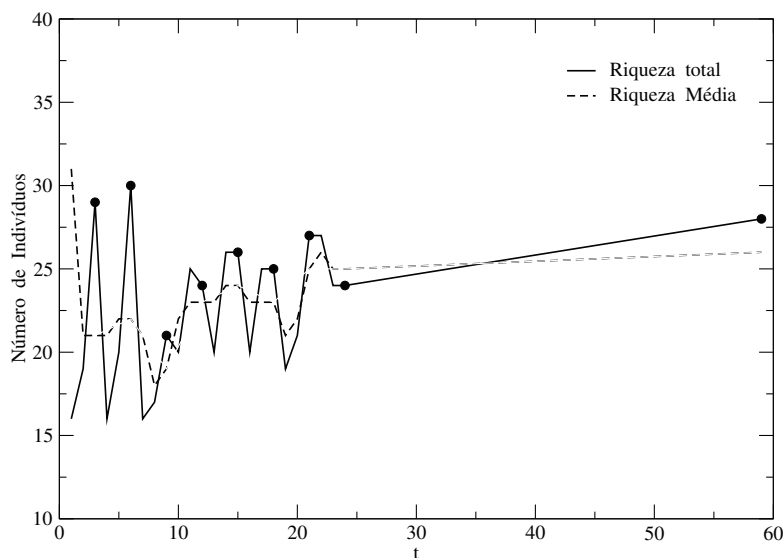


Figura 13 Riqueza de espécies observada durante os monitoramentos de fauna na galeria artificial, linha preenchida corresponde a riqueza total e linha pontilhada a riqueza média. Os círculos preenchidos indicam os inventários detalhados, de periodicidade trimestral

las que estiveram presentes em pelo menos nove visitas à cavidade.

Foram observados dois padrões principais de oscilação populacional. Estes foram padrões mais recorrentes, observados em 13 das 23 espécies estabelecidas. As demais espécies apresentaram padrões diferenciados, alguns dos quais únicos.

O primeiro padrão consistiu no aumento gradual da população, que atingiu um pico de abundância no final do primeiro ano de monitoramento. Após este pico, houve uma tendência à queda no tamanho populacional, que gerou uma considerável redução nas populações ao final do segundo ano de monitoramento. Após esta queda, houve a recuperação das populações, que entraram novamente em ascensão, tendência que se manteve ainda no último monitoramento (Figura 14).

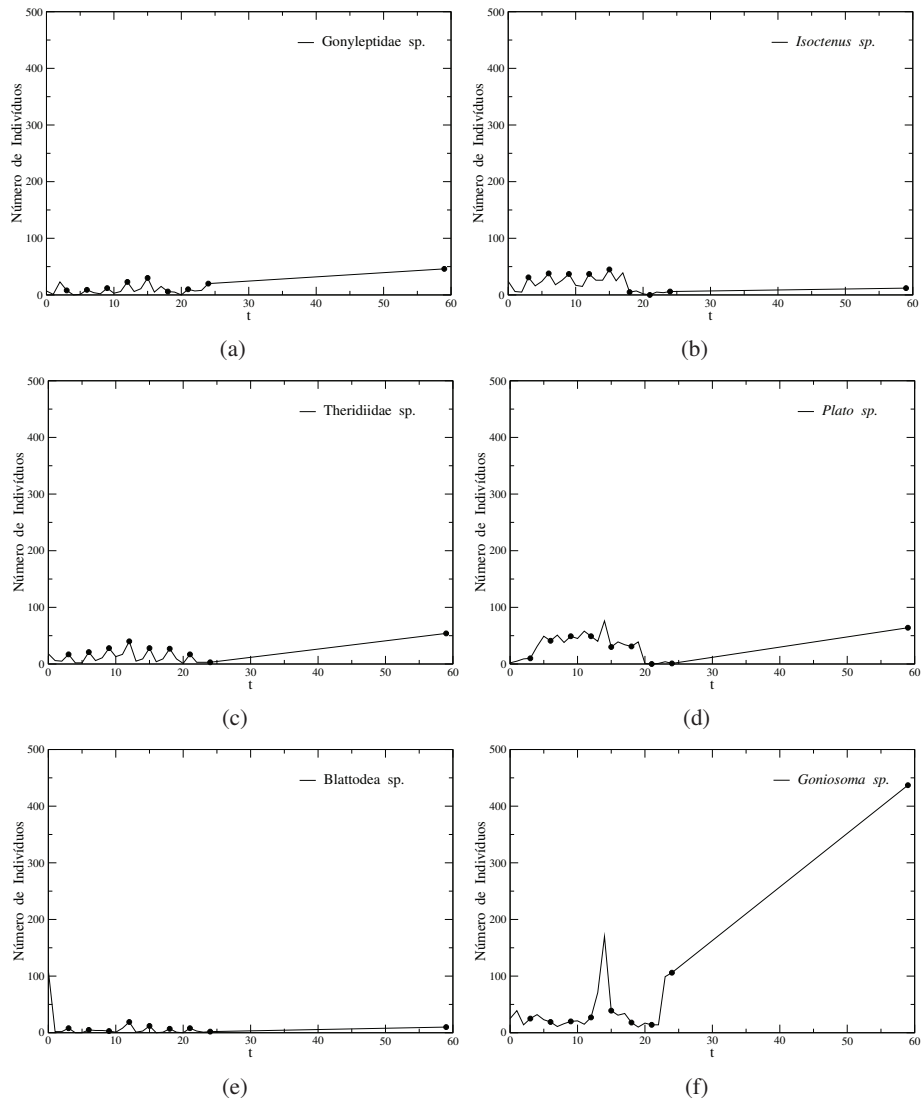


Figura 14 Variação temporal da abundância de algumas espécies durante o monitoramento de fauna na galeria artificial: *Gonyleptidae sp.* (Opiliones) (a); *Isoctenus sp.* (Araneae: Ctenidae) (b); *Theridiidae sp.* (Araneae) (c); *Plato sp.* (Araneae: Theridiosomatidae) (d); *Blattodea sp.* (d) e *Goniosoma vatrax* (Opiliones: Gonyleptidae) (e). Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

O padrão anteriormente descrito foi observado em seis espécies (Gonyleptidae sp., *Isoctenus sp.*, Theridiidae sp., *Plato sp.*, Blattodea sp. e *Goniosoma vatrax*), três das quais predadoras (*Isoctenus sp.*, Theridiidae sp. e *Plato sp.*), duas onívoras (Gonyleptidae sp. e *Goniosoma vatrax*) e uma detritívora generalista (Blattodea sp.). Dentre estas espécies, destaca-se *Goniosoma vatrax* (Opiliones: Gonyleptidae) que apresentou um aumento populacional expressivo no período final dos monitoramentos. Esta espécie é troglóxena, ou seja, é encontrada no ambiente subterrâneo, mas sai regularmente para se alimentar. Este súbito aumento na população pode estar relacionado a um eventual aumento na disponibilidade de presas no meio epígeo, embora não seja claro o real motivo deste aumento.

Acredita-se, desta forma, que o aumento inicial das populações das espécies predadoras pode ter decorrido devido a grande disponibilidade de presas, representadas muitas vezes por espécies “eventuais”, que passaram a colonizar a galeria logo após sua abertura. Tais presas permitiram um gradual aumento nas populações destas espécies. Entretanto, com o amadurecimento da cavidade, muitas destas espécies “eventuais” foram substituídas, o que levou a uma escassez alimentar para estes predadores. A partir deste momento, tais populações começaram a diminuir, tendo em vista a falta de presas, o que explica a redução populacional observada no final do segundo ano de monitoramento. No entanto, as espécies detritívoras que se estabeleceram, provavelmente passaram a funcionar como recursos mais temporalmente estáveis, o que permitiu o restabelecimento das populações de predadores.

O segundo padrão consistiu na presença de dois picos de elevação no tamanho populacional de 7 espécies (*Endecous sp.*, Formicidae sp., Collembola sp., Paradoxosomatidae sp. - Figura 15, *Arrhopalites sp.*, *Eidimanacris sp.* e Pselaphinae sp2 - Figura 16). Tais picos não ocorreram de forma sincrônica entre

as diferentes espécies, de forma que o efeito estacional não pode ser utilizado para explicar estas oscilações para todas estas espécies.

Após o segundo pico populacional, citado anteriormente, houve uma tendência de queda no tamanho de todas as populações ao final do segundo ano do monitoramento (Figuras 15 e 16). Uma vez que os picos não foram coincidentes, é praticamente impossível gerar uma explicação única que seja plausível para todas as espécies. No entanto, pelo menos a queda ao final do segundo ano pode ser resultado da redução no tamanho da colônia de *Glossophaga sp.*, espécie de morcego nectarívora que se estabeleceu na cavidade (Figura 17). Indivíduos desta espécie se estabeleceram bem no início do monitoramento. A colônia cresceu, manteve-se estável por quase um ano e depois começou a reduzir. Ao final do segundo ano de monitoramento, a colônia apresentou-se bastante reduzida, contendo 1 - 2 indivíduos. Como estes organismos se alimentam no meio externo, importam alimento, na forma de fezes ou guano, para seus respectivos habitats subterrâneos. Desta forma, o aumento do tamanho da colônia durante os meses iniciais do monitoramento certamente elevou a quantidade de guano produzida, o que pode ter elevado o tamanho populacional de algumas espécies detritívoras. Entretanto, com a diminuição na oferta de guano, a partir de meados do segundo ano, as populações de invertebrados detritívoros certamente se retraíram.

Sete espécies de invertebrados mostraram oscilações populacionais que não se enquadraram nos dois padrões descritos anteriormente (Figuras 18 e 19). Tais espécies apresentaram picos variáveis de aumentos populacionais. Além disso, enquanto algumas espécies tenderam à redução da população ao final dos monitoramentos (*Entomobryidae sp.*, *Conicera sp.*, *Pseudonannolene sp.*; *Gastropoda sp.*, *Mesabolivar sp.* e *Pselaphinae sp1* - espécie troglóbia), outra espécie apresentou tendência oposta, isto é, de aumento populacional (*Chelodesmidae sp.*).

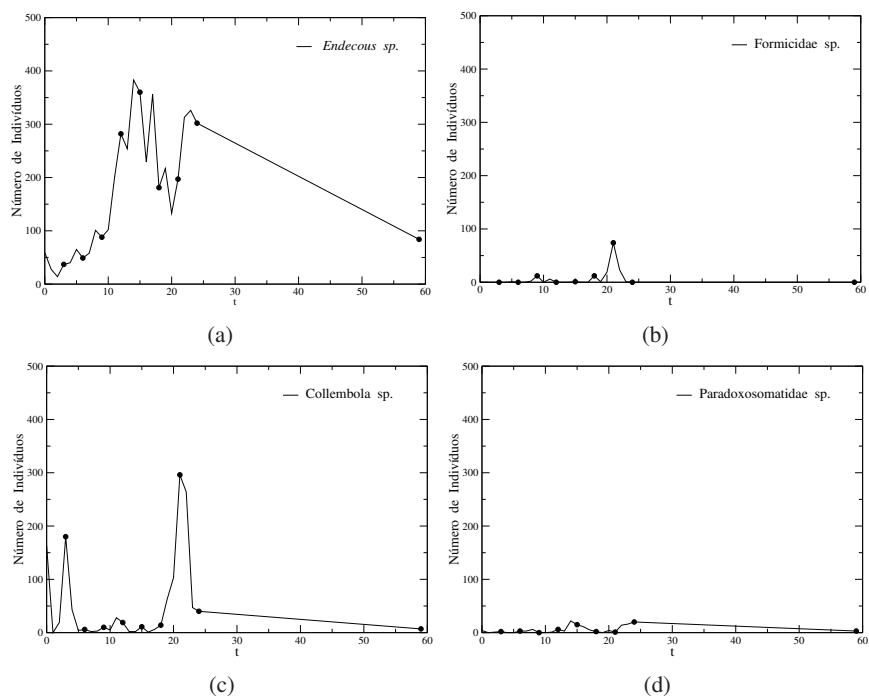


Figura 15 Variação temporal da abundância de algumas espécies durante o monitoramento de fauna na galeria artificial: *Endecous sp.* (Ensifera: Phalangopsidae) (a); *Formicidae sp.* (Hymenoptera) (b); *Collembola sp.* (c) e *Paradoxosomatidae sp.* (Diplopoda: Polydesmida) (d). Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

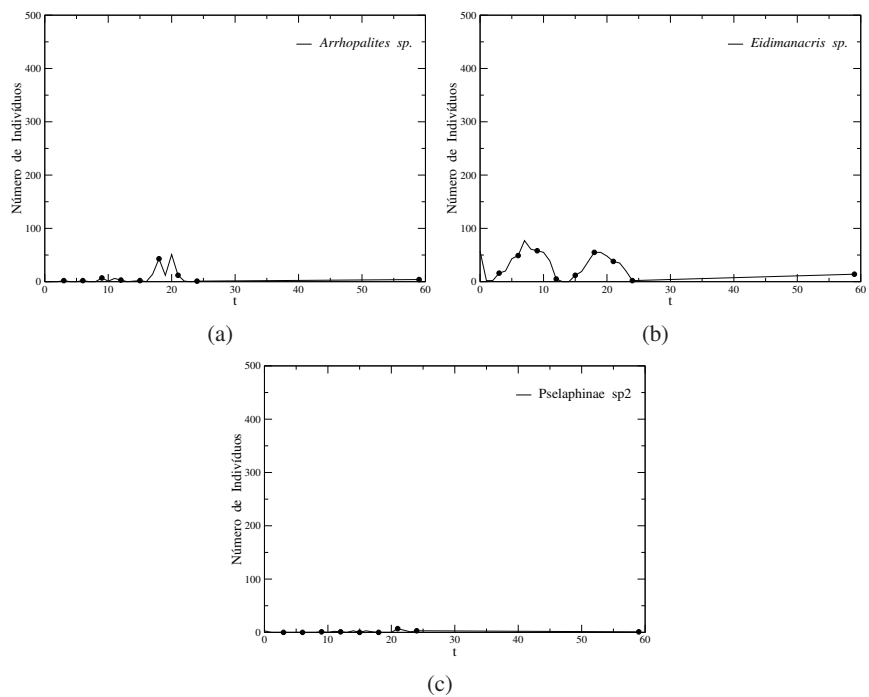


Figura 16 Variação temporal da abundância de algumas espécies durante o monitoramento de fauna na galeria artificial: *Arrhopalites sp.* (Collembola: Arrhopalitidae) (a); *Eidimanageris sp.* (b) e *Pselaphinae sp2* (Coleoptera) (c). Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

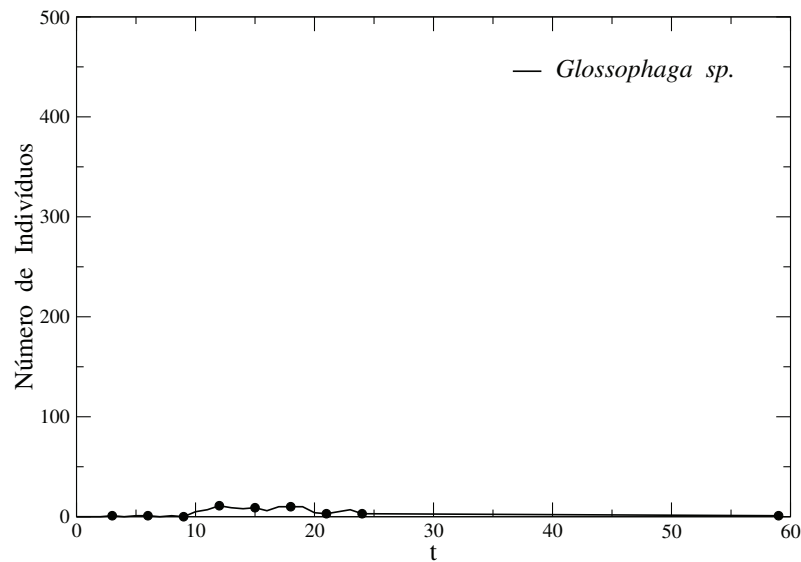


Figura 17 Variação temporal da abundância da colônia de *Glossophaga sp.* (Phyllostomidae) durante o monitoramento de fauna na galeria artificial. Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

3.6 Grupos troglomórficos

Dentre as 57 espécies translocadas, somente duas apresentavam caracteres troglomórficos (*Dipluridae sp.* e *Ortheziidae sp.*). Nenhuma destas espécies se estabeleceu na galeria.

Porém, 8 espécies troglomórficas colonizaram a galeria durante o início do monitoramento. Tais espécies consistem de uma pequena minhoca (*Anellida sp.*), um verme (*Nematoda sp.*), uma pequena centopéia (*Polydesmida sp.*), duas aranhas, um besouro (*Pselaphinae sp1*), um opilião e um colêmbolo (*Arrhopalites sp.*).

Como são possivelmente troglóbias, tais espécies certamente colonizaram a galeria advindas de outros compartimentos subterrâneos conectados à cavidade artificial por meio de canalículos presentes na canga. Tal fato demonstra clara-

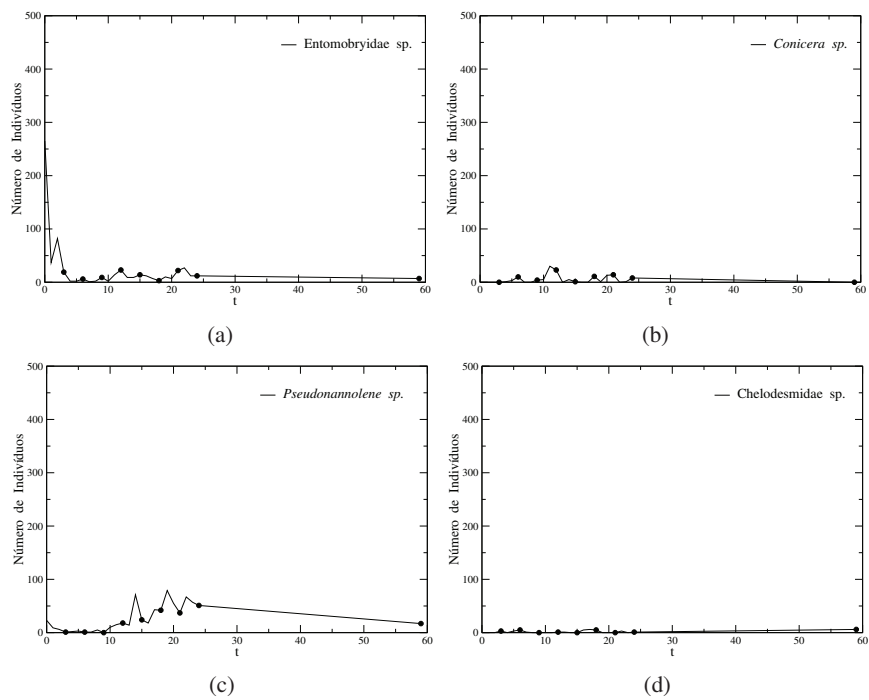


Figura 18 Variação temporal da abundância de algumas espécies durante o monitoramento de fauna na galeria artificial: *Entomobryidae* sp. (Collembola) (a); *Conicera* sp. (Diptera: Phoridae) (b); *Pseudonannolene* sp. (Diplopoda: Pseudonannolenidae) (c); *Chelodesmidae* sp. (Diplopoda: Polydesmida) (d). Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

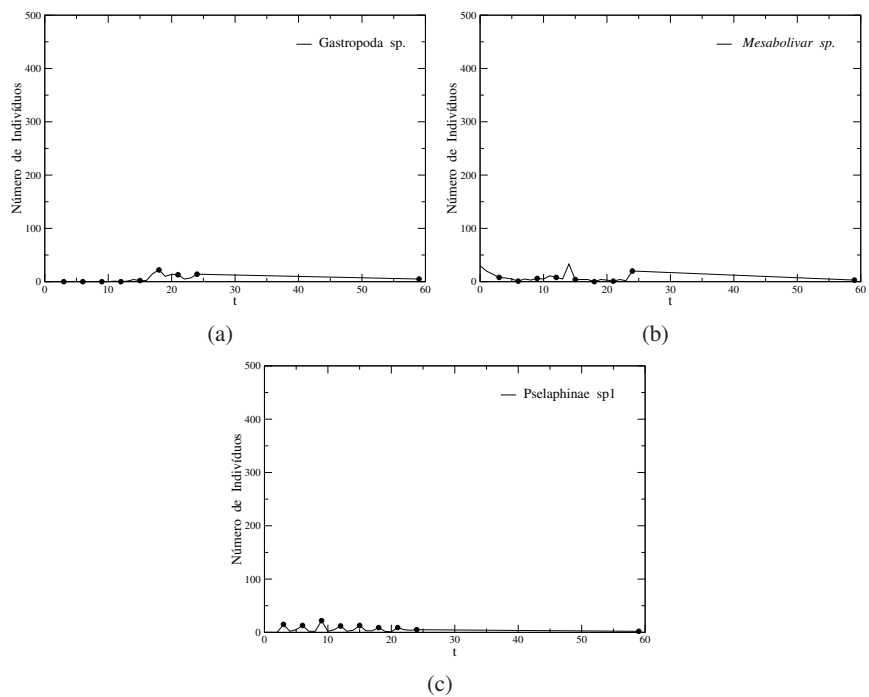


Figura 19 Variação temporal da abundância de algumas espécies durante o monitoramento de fauna na galeria artificial: Gastropoda sp. (a); *Mesabolivar sp.* (Aranae: Pholcidae) (b) e Pselaphinae sp1 (Coleoptera - Troglóbio) (c). Os monitoramentos detalhados estão representados por círculos preenchidos

mente que o habitat de muitas espécies subterrâneas associadas a relevos ferruginosos pode se estender muito além das macrocavernas.

Desta forma, é fundamental que certas áreas onde predominam relevos ferruginosos sejam preservadas, independentemente da presença de macrocavernas. Tal medida deve ser tomada para assegurar a manutenção de habitats intersticiais. Esses habitats mantêm uma riqueza aparentemente elevada de espécies, mas ainda permanecem extremamente desconhecidos.

3.7 Eventos reprodutivos

Durante as últimas visitas à cavidade ainda para a translocação de fauna, foi possível observar alguns indicativos positivos sobre o experimento em execução. O primeiro deles consiste de um opilião fêmea que depositou seus ovos no interior da galeria (Figura 20(a)). Esta espécie é troglóxena, devendo deixar periodicamente a cavidade onde habita para buscar alimentos no sistema externo. Desta forma, tal espécie seria a mais propensa a deixar a cavidade artificial caso não houvesse se adaptado a este novo sistema. No entanto, a deposição dos ovos foi um indicativo de que a galeria artificial fornecia as condições necessárias para o estabelecimento desta espécie. No dia 30 de Outubro de 2004, durante a realização de mais uma etapa da translocação, foram encontrados filhotes recém eclodidos (Figura 20(b)). Os filhotes desta prole já reconhecerão a cavidade artificial enquanto seu habitat original, o que é um indicativo positivo do estabelecimento desta espécie. Várias outras fêmeas de *Goniosoma vatrax* depositaram seus ovos na galeria durante a estação chuvosa, entre o final de 2004 e início de 2005. Em Junho de 2005, foi registrada a presença de uma fêmea ovada. A partir de Agosto, várias fêmeas iniciaram as posturas, o que levou ao segundo evento de reprodução na galeria artificial.

Algumas espécies reproduziram-se durante muitos meses, desde a estação chuvosa até a estação seca. Espécies como *Mesabolivar sp.* (Figura 21) e *Theridiidae sp.* foram encontradas com ootecas mesmo nos meses de seca, como Julho e Agosto. Outras espécies já preferiram o início da estação chuvosa para a reprodução, como *Isoctenus sp.* (Figura 22), *Pseudonannolene sp.* e outros diplópodes.

A colônia de *Glossophaga sp.* estabelecida na cavidade também iniciou o período reprodutivo no início da estação chuvosa, quando foram observados machos com testículos escrotados e fêmeas carregando filhotes.



(a)



(b)

Figura 20 Eventos reprodutivos de *Goniosoma vatrax* observados na cavidade artificial. Fêmea depositando seus ovos na cavidade (a) e filhotes eclodidos (b)

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira



Figura 21 Fêmea de *Mesabolivar sp.* com ooteca
Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira



Figura 22 Fêmea de *Isoctenus sp.* com ooteca
Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora muitas espécies não tenham se estabelecido na cavidade, isto já era previsto, de modo que não se pode encarar tal resultado como negativo. Muitas espécies translocadas (39 espécies) possuíam baixa probabilidade de se estabelecer. No entanto, somente 26 espécies não foram mais observadas na cavidade, número inferior ao previsto.

Além disso, o número de espécies que colonizaram a cavidade superou em muito as expectativas. Tais espécies certamente foram essenciais ao amadurecimento da cavidade, principalmente nos primeiros meses após a translocação.

Outro fato que merece menção é o número de espécies efetivamente estabelecidas na galeria. Embora fosse esperado o estabelecimento de 18 espécies, 23 espécies se encontraram estabelecidas na cavidade. Além destas, outras espécies permaneceram em trânsito, utilizando a galeria como parte integrante de seus habitats.

A colonização da cavidade por vertebrados, embora tivesse sido prevista, foi bem mais intensa do que o esperado. Tal fato é extremamente positivo, uma vez que tais organismos exercem a função de importadores de matéria orgânica para o interior da galeria, contribuindo intensamente para a manutenção trófica da cavidade.

Outro fato que merece destaque é a colonização da galeria por organismos troglomórficos. Segundo Ferreira (2011), as espécies troglomórficas apresentam elevada sensibilidade à mudanças bruscas no ambiente e distribuição restrita, além de elevado grau de endemismo. Logo, se a galeria artificial foi colonizada por estas espécies, esta apresentou condições adequadas e favoráveis para a colonização e estabelecimento de organismos troglomórficos.

Destaca-se também a grande similaridade da fauna observada no último mês de monitoramento contínuo (22 de Novembro de 2006) em relação àquela observada durante a visita realizada em 22 de Outubro de 2009, quase três anos após a penúltima visita. Inicialmente o tempo proposto para o monitoramento foi de 2 anos. Entretanto, tal período foi arbitrariamente estipulado, tendo em vista a inexistência de estudos deste tipo no Brasil e mesmo no mundo. Desta forma, pode-se considerar que o tempo proposto para o acompanhamento da comunidade, dois anos após a instalação do experimento de translocação, foi satisfatório pelo menos para sistemas ferruginosos, já que a comunidade presente ao final do segundo ano de monitoramento se manteve nos anos seguintes.

Sumariamente, considera-se que a ação de translocação atingiu os três principais objetivos da soltura de animais, em termos de conservação, a sobrevivência dos organismos após a soltura, seu estabelecimento na nova área e sucesso reprodutivo (GOSLING; SUTHERLAND, 2000; FESTA-BIANCHET; APOLLONIO, 2003; LETTY et al., 2003). Portanto, pode-se considerar que a translocação obteve êxito, maior do que o esperado.

REFERÊNCIAS

- DICKENS, M. J.; DELEHANTY, D. J.; ROMERO, L. M. Stress: An inevitable component of animal translocation. **Biological Conservation**, v. 143, p. 1329–1341, 2010.
- ELLIOTT, W. R. Dramming up the cave. **Caving International**, v. 10, p. 38–41, 1981.
- ELLIOTT, W. R. **Final report on the New Melones cave harvestman transplant**. Contract #DACW05 – 78 – C – 0007#, U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Califórnia, 1978.
- FESTA-BIANCHET, M.; APOLLONIO, M. **Animal behavior and wildlife conservation**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.
- FERREIRA, R. L. A vida subterrânea em campos ferruginosos. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 106–115, jul. 2005.
- GOSLING, L. M.; SUTHERLAND, W. J. **Behaviour and conservation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- HOLSINGER, R.; CULVER, D. C. **The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of eastern Tennessee: Zoogeography and ecology**. North Carolina: State Museum of Natural Sciences, 1988. 164 p.
- HOWARTH, F. B. Hawaii. In: JUBERTHIE, C.; DECU, V. (Ed.). **Enciclopaedia biospeologica**. Moulis: Societé Internationale de Biospéology, 2001. v. 3, p. 2175-2181.
- LETTY, J. et al. Effect of translocation on survival in wild rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). **Mammalian Biology**, v. 68, p. 250–255, 2003.
- PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à espeleologia. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 7–24.
- SOUZA-SILVA, M. **Dinâmica de disponibilidade de recursos alimentares em uma caverna calcária**. 2003. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the brazilian atlantic rain forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 1713–1729, 2011.

TEIXEIRA, C. P. et al. Revisiting translocation and reintroduction programmes: The importance of considering stress. **Animal Behaviour**, v. 73, p. 1–13, 2007.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ESPACIAL DE UMA REDE TRÓFICA ESTABELECIDADA EM UMA GALERIA ARTIFICIAL

RESUMO

Embora ecossistemas tendam a representar associações altamente complexas, os sistemas cavernícolas podem compreender “laboratórios naturais” para testar modelos ecológicos, em função de sua simplicidade. Além, da importância do estudo desses sistemas para o desenvolvimento da ciência, eles também atuam no equilíbrio de ecossistemas em sua área de ocorrência. Apesar de sua grande importância, esses sistemas são altamente ameaçados por atividades antrópicas, principalmente pela mineração. Nesse contexto, Ferreira desenvolveu, em 2004, um experimento de translocação de fauna cavernícola de uma cavidade natural, que seria destruída pela expansão de uma lavra de minério de ferro, para uma galeria artificial. Durante o monitoramento de tal experimento, foram gerados mapas com a abundância e distribuição espacial das espécies. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar tais dados, fornecendo informações sobre as espécies e interações estabelecidas entre elas, uma vez que existem poucos trabalhos que descrevem a biologia e ecologia de animais cavernícolas e suas interações. Foram realizadas análises espaciais de padrão de pontos uni e multivariadas. Dentre os principais resultados, observou-se que as espécies apresentaram uma expressiva tendência a formação de *clusters*. Além disso, a comunidade analisada apresentou respostas sazonais e houve uma predominância de interações de atração entre as espécies. Tais fatos podem ser justificados pela característica oligotrófica de sistemas subterrâneos e pelo fluxo e distribuição de recursos. Destaca-se ainda que as interações de atração podem ser produto das interações ecológicas e/ou da preferência por microhabitats. Dessa maneira, espera-se que este trabalho contribua para um maior conhecimento sobre as espécies cavernícolas analisadas e conseqüentemente contribua para a análise de projetos de translocação de fauna como alternativa para a conservação de sistemas subterrâneos ferruginosos.

Palavras-chave: Translocação de fauna cavernícola. Sistema ferruginoso. Análise Espacial de Padrão de Pontos. *Cluster*. Agregações. Interações de atração.

ABSTRACT

Although ecosystems tend to represent highly complexity associations, the cave systems can comprise “natural laboratories” to test ecological models because of their simplicity. In addition to the importance of the study of these systems to the development of science, they also act on the balance of ecosystems in their range. Despite their great importance, these systems are highly threatened by human activities, mainly by mining. In this context, Ferreira developed in 2004 a translocation experiment of cave fauna from a natural cavity, which would be destroyed by the expansion of iron mining, to an artificial gallery. During the monitoring of such experiment, maps with the abundance and spatial distribution of the species were generated. Thus, the objective of this work is to analyze these data, providing information of the species and their interactions, since there are few studies that describe the biology and ecology of cave animals and their interactions. Spatial analysis of univariate and multivariate point patterns were performed. Among the main results, it was observed that the species had a significant tendency to cluster formation. In addition to this, the analyzed community showed seasonal responses and there was a predominance of attraction interactions among species. Such facts can be justified by the oligotrophic characteristic of underground systems and by the resource flow and distribution. Note also that the attraction interactions may be a product of ecological interactions and / or preference for microhabitats. Therefore, it is expected that this study helps to increase knowledge about the analyzed cave species and consequently it can contribute to the analysis of wildlife translocation projects as an alternative for the ferruginous underground system conservation.

Keywords: Translocation of cave fauna, Ferruginous system. Spatial Point Pattern Analysis. Cluster. Aggregations. Attraction interactions.

1 INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

Ecosistemas frequentemente compreendem associações altamente complexas de indivíduos que interagem entre si e também com o ambiente (GREEN et al., 2005; SCHAFFER, 1981). No entanto, os ambientes cavernícolas podem ser considerados “laboratórios naturais” para o teste de modelos ecológicos, em função de sua simplicidade (POULSON; WHITE, 1969). Tal característica pode ser justificada pelo fato desses ambientes apresentarem clima estável e redes tróficas mais simples e mais fáceis de analisar do que aquelas presentes no meio epígeo (CULVER, 2012; POULSON; WHITE, 1969). Essa simplicidade permite a análise de processos biológicos e geológicos que muitas vezes são difíceis de estudar em ambientes mais complexos (POULSON; WHITE, 1969). Apesar dessas características, ainda existem poucos trabalhos que investigam características ecológicas de animais encontrados em cavernas e também poucos estudos sobre redes tróficas cavernícolas (FERREIRA, 2005; FERREIRA, Rodrigo, 2011). Culver (2012) afirma que redes tróficas mais completas foram construídas para poucas comunidades subterrâneas.

Apesar da grande importância das cavernas para estudos biológicos e também para o equilíbrio de ecossistemas em suas áreas de ocorrência (FERREIRA, Rodrigo, 2011), diversas atividades antrópicas são causadoras de impactos em sistemas cavernícolas. Dentre essas atividades destacam-se a mineração, agropecuária, turismo, represamentos, urbanização e obras de engenharia (FERREIRA, Cristiano, 2011). A mineração é um dos principais impactos que promove a degradação de cavernas em sistemas ferruginosos, uma vez que tais cavidades geralmente estão associadas aos maiores teores de minério de ferro (FERREIRA, Cristiano, 2011). Nesse contexto, Ferreira, em 2004, realizou o primeiro projeto

de translocação de fauna que envolveu a construção de uma cavidade artificial com a finalidade exclusiva de receber indivíduos provenientes de uma caverna ferruginosa natural. O objetivo principal desse projeto foi translocar parte da comunidade de invertebrados de uma caverna ferruginosa, que seria suprimida pela expansão da lavra de minério de ferro, para a cavidade artificial construída. Tal caverna natural corresponde à gruta de Capão Xavier II localizada nas mediações da cidade de Nova Lima (Minas Gerais), pertencente ao Quadrilátero Ferrífero.

O referido experimento, que envolveu não somente a translocação da fauna, mas também o monitoramento da comunidade, forneceu dados de abundância e distribuição espacial das espécies registradas durante o trabalho. Infelizmente, ainda existem poucos estudos sobre a biologia de invertebrados cavernícolas e para a maior parte das espécies brasileiras nada é conhecido sobre sua biologia. Nesse contexto, as análises espaciais de padrão de pontos podem representar ferramentas úteis para a investigação sobre os possíveis padrões espaciais apresentados por estas espécies, como comportamentos sazonais e variações de distribuição espacial no sistema estudado.

Dessa maneira, o objetivo principal deste trabalho é analisar os padrões espaciais apresentados por algumas espécies, que foram translocadas ou que colonizaram ativamente a cavidade artificial, registradas durante o experimento realizado por Ferreira, em 2004.

2 METODOLOGIA

2.1 Organização dos Dados para Análise

Os dados utilizados para análise são resultantes do trabalho de translocação de fauna cavernícola e posterior monitoramento da comunidade translocada realizado por Ferreira, em 2004. Tais dados correspondem a dados de abundância e distribuição espacial de cada espécie que foi translocada para a cavidade artificial (57 espécies) e também das que colonizaram ativamente o ambiente (79 espécies). Assim, na data de translocação, 06 de Novembro de 2004, tem-se a quantidade de indivíduos de cada espécie. Nos monitoramentos seguintes, existem dados de abundância e mapas com a distribuição espacial de cada espécie presente na cavidade. Esses monitoramentos foram realizados mensalmente até o ano de 2006 e o último levantamento foi feito três anos depois, em 2009.

Os monitoramentos foram diferenciados em duas categoriais, monitoramentos superficiais e detalhados. Os primeiros foram realizados mensalmente e correspondem à inspeções superficiais da cavidade para minimizar o impacto do monitoramento sobre a comunidade. As inspeções detalhadas foram realizadas trimestralmente, nas quais todos os microhabitats eram cautelosamente inspecionados. Para caracterizar o topoclima da galeria, dados sobre temperatura e umidade do ar foram coletados em cada visita. Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados os monitoramentos, datas de realização, sua classificação e dados sobre o topoclima. À cada monitoramento foi atribuído um valor de t , que pode ser interpretado como um parâmetro de unidade temporal, medido em meses. O valor de $t = 0$ corresponde ao início da translocação, ou seja, soltura dos indivíduos (Tabela 1).

Tabela 1 Início da translocação (soltura dos indivíduos) e monitoramentos pós-soltura (1 - 12) com as especificações das respectivas datas de realização, tempo t correspondente e classificação, sendo esta dividida em superficial e detalhada. Também são informados os dados topoclimáticos, temperatura, em graus Celsius, umidade relativa, em %, e a estação, sendo esta dividida em seca e chuvosa

Monitoramento (M)	Data	Parâmetro t	Classificação	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Estação
Início (soltura dos indivíduos)	06 de Novembro de 2004	0	-	-	-	Chuvosa
M 1	23 de Dezembro de 2004	1	Superficial	23,0	98,0	Chuvosa
M 2	14 de Janeiro de 2005	2	Superficial	20,0	95,0	Chuvosa
M 3	27 de Fevereiro de 2005	3	Detalhado	21,0	90,0	Chuvosa
M 4	16 de Março de 2005	4	Superficial	21,2	95,0	Chuvosa
M 5	23 de Abril de 2005	5	Superficial	21,7	80,0	Chuvosa
M 6	14 de Maio de 2005	6	Detalhado	20,5	83,0	Seca
M 7	26 de Junho de 2005	7	Superficial	18,0	82,0	Seca
M 8	23 de Julho de 2005	8	Superficial	18,4	80,0	Seca
M 9	21 de Agosto de 2005	9	Detalhado	18,7	76,0	Seca
M 10	22 de Setembro de 2005	10	Superficial	19,4	88,0	Seca
M 11	27 de Outubro de 2005	11	Superficial	20,1	93,0	Seca
M 12	19 de Novembro de 2005	12	Detalhado	20,7	90,0	Chuvosa

Tabela 2 Monitoramentos pós-soltura (13 - 59) com as especificações das respectivas datas de realização, tempo *t* correspondente e classificação, sendo esta dividida em superficial e detalhada. Também são informados os dados topoclimáticos, temperatura, em graus Celsius, umidade relativa, em %, e a estação, sendo esta dividida em seca e chuvosa

Monitoramento (M)	Data	Parâmetro <i>t</i>	Classificação	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Estação
M 13	19 de Dezembro de 2005	13	Superficial	19,5	95,0	Chuvosa
M 14	21 de Janeiro de 2006	14	Superficial	20,0	93,0	Chuvosa
M 15	18 de Fevereiro de 2006	15	Detalhado	20,8	95,0	Chuvosa
M 16	18 de Março de 2006	16	Superficial	21,3	98,0	Chuvosa
M 17	27 de Abril de 2006	17	Superficial	20,7	93,0	Chuvosa
M 18	25 de Maio de 2006	18	Detalhado	19,6	93,0	Seca
M 19	29 de Junho de 2006	19	Superficial	17,5	85,0	Seca
M 20	20 de Julho de 2006	20	Superficial	17,0	80,0	Seca
M 21	24 de Agosto de 2006	21	Detalhado	18,0	80,0	Seca
M 22	29 de Setembro de 2006	22	Superficial	18,2	80,0	Seca
M 23	20 de Outubro de 2006	23	Superficial	19,0	92,0	Seca
M 24	22 de Novembro de 2006	24	Detalhado	19,2	93,0	Chuvosa
M 59	22 de Outubro de 2009	25	Detalhado	19,0	85,0	Seca

Portanto, no trabalho descrito anteriormente, foram gerados mapas para cada um dos vinte e cinco monitoramentos realizados. Cada mapa corresponde à planta baixa da cavidade, acrescida da projeção das paredes, com a localização espacial de cada indivíduo observado, além dos registros de temperatura e umidade (Figura 1 (a)). Ressalta-se que a cavidade é uma estrutura tridimensional e esta foi bidimensionalizada, como se a galeria tivesse sido aberta e projetada em um plano.

Em cada mapa, um número foi atribuído a cada espécie e esse número era anotado no interior da planta baixa da cavidade no local onde os indivíduos daquela espécie foram encontrados. Porém, esses números variavam de um monitoramento para outro de acordo com a quantidade total de espécies observadas. Por exemplo, a espécie *Blattodea* sp., no terceiro monitoramento era representada pelo número 12 e no sexto pelo número 11. Assim, a primeira etapa da organização dos dados foi padronizar as espécies e seus respectivos números (Figura 1 (b)). Como na translocação foi registrada a presença de 136 espécies, cada espécie foi identificada por um número, totalizando 136 números.

Após a padronização, surgiu um outro problema. Os vinte e cinco mapas de monitoramento apresentavam diferenças de escala. Dessa maneira, a próxima etapa foi selecionar a planta da cavidade nos mapas, seguindo suas delimitações, com o objetivo de que eles apresentassem a mesma escala e origem, como apresentado na Figura 1 (c). Essa etapa da organização dos dados foi realizada no programa *LibreOffice Draw*. Após essa seleção, os mapas foram recortados no *software GIMP (GNU Image Manipulation Program)*, resultando em vinte e cinco mapas com a mesma escala e origem (Figura 1 (d)).

Em seguida, ainda utilizando o *software GIMP*, foram anotadas as coordenadas cartesianas (x,y) de cada indivíduo registrado. O cursor do computador era

posicionado em cima do número que indicava a presença de um indivíduo de uma determinada espécie no mapa e eram indicadas as posições x e y desse indivíduo (Figura 1 (e)). Com essa ferramenta, foi possível gerar uma planilha, na qual cada indivíduo era caracterizado pela sua espécie e posição no espaço bidimensional (Figura 1 (f)).

2.2 Seleção dos Dados para Análise

Após a etapa de organização inicial dos dados, que resultou em uma planilha para cada monitoramento, com os indivíduos observados, suas respectivas espécies e coordenadas espaciais, iniciou-se a seleção dos dados para a análise. Primeiramente, foi feita uma investigação sobre a variação temporal da abundância das 136 espécies registradas. Destas, foram selecionadas as que apresentaram maior persistência temporal, ou seja, que foram registradas em um número maior de monitoramentos detalhados. Estes foram priorizados, por representarem uma inspeção detalhada da galeria, ou seja, refletirem de forma mais real a verdadeira abundância. Assim, foram analisadas dez espécies: *Entomobryidae sp.*, *Collembola sp.*, *Endecous sp.*, *Eidmanacris sp.*, *Blattodea sp.*, *Gonyleptidae sp.*, *Pselaphinae sp1*, *Goniosoma vatrax*, *Theridiidae sp.* e *Isoctenus sp.*

Considerando as espécies selecionadas, pode-se propor, com base no conhecimento já existente e em observações de campo, a rede trófica apresentada na Figura 2. A base trófica do sistema é representada pela matéria orgânica, como folhas e troncos (Figura 3(a)), principalmente levados pelo vento e pela água para o interior da cavidade, além dos que foram colocados no sistema durante a construção da galeria. Além da matéria orgânica, também é representada, no diagrama, a presença de guano (Figura 3(b)) da espécie de morcego nectarífero *Glossophaga sp.* Destaca-se a presença de fungos (Figura 3(c)), que também são fonte de ali-

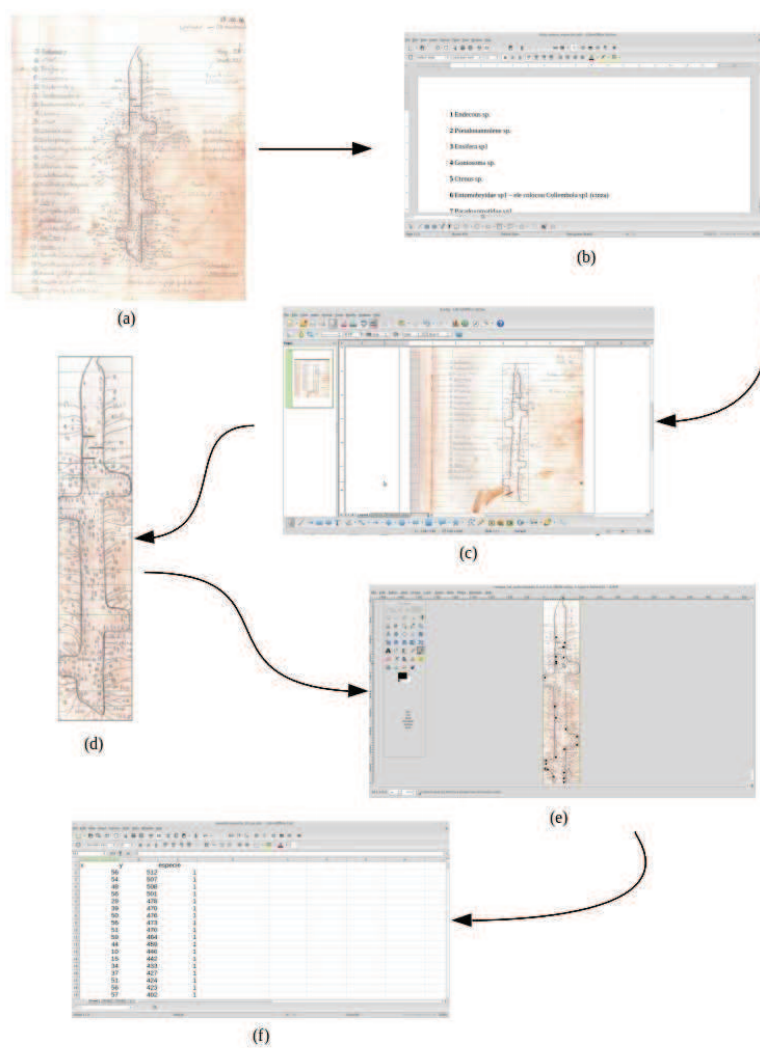


Figura 1 Etapas da organização dos dados para análise. Em (a), está representado um os mapas gerados durante os monitoramentos da galeria artificial. Padronização realizada para as espécies e seus respectivos números (b) e seleção da planta baixa (c) e (d). Interface do *software GIMP* utilizado para os registros das coordenadas (x,y) (e) e tabela final (f)

mento para outros organismos da cavidade (FERREIRA, 2005). A base trófica, descrita anteriormente, foi representada na Figura 2, porém não foi quantificada durante os monitoramentos e assim, não foi considerada nas análises desenvolvidas.

Pode-se observar na Figura 2 que as espécies detritívoras são representadas por: duas espécies de colêmbolos (*Entomobryidae* sp. - Figura 3(d) e *Collembola* sp. - Figura 3(e)), duas espécies de grilos (*Endecous* sp. - Figura 3(f) e *Eidmanacris* sp. - Figura 3(g)) e uma barata (*Blattodea* sp. - Figura 3(h)).

Na rede trófica proposta (Figura 2) também são representadas três espécies onívoras. Uma dessas espécies é um opilião, *Gonyleptidae* sp. (Figura 4(a)) e a outra corresponde a uma espécie de besouro, *Pselaphinae* sp1 (Figura 4(b)). Esta é uma espécie troglóbia, ou seja, restrita a ambientes cavernícolas, que colonizou ativamente a galeria. A terceira espécie corresponde a um opilião, *Goniosoma vatrax*, (Figura 4(c)), que é fonte de recurso para uma das espécies da rede, porém alimenta-se fora da caverna, sendo assim, classificada como uma espécie troglóxena.

Dentre as espécies predadoras incluídas na rede trófica analisada está presente uma espécie de aranha de solo que faz teia e apresenta estratégia do tipo “senta e espera”, *Theridiidae* sp. (Figura 4(d)). Como predador de topo, destaca-se a aranha cursorial *Isoctenus* sp. (Figura 4(e)), que vive no chão e apresenta hábito de procurar presas. Durante os monitoramentos, foi observado um hábito canibal para essa espécie, sendo que foram registrados adultos se alimentando de jovens da mesma espécie.

As espécies que apresentam relações competitivas mais intensas, característica estabelecida por meio do tamanho corporal, foram representadas em retângulos de coloração cinza (Figura 2). Ressalta-se ainda que a maioria das espécies

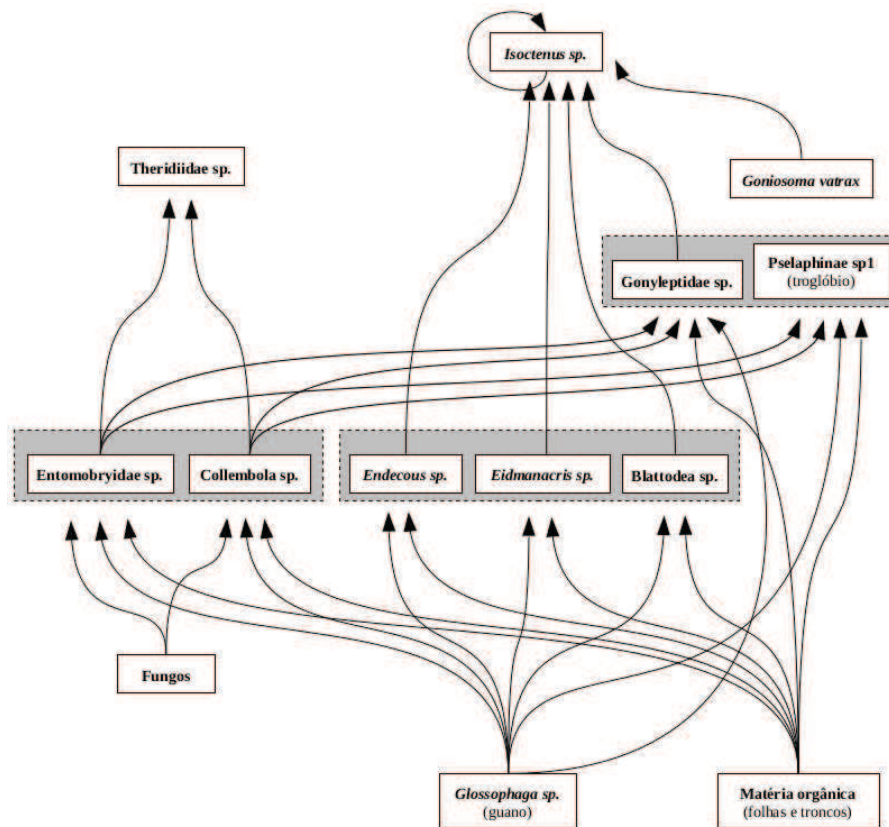


Figura 2 Modelo diagramático da rede trófica analisada. Os grupos de espécies que estabelecem relações competitivas mais intensas foram agrupadas por meio de retângulos na coloração cinza

registradas não foram identificadas até o nível específico ou genérico por falta de especialistas ou pelo fato das mesmas representarem espécies não descritas.

2.3 Análise Espacial de Padrão de Pontos

Um padrão de pontos pode ser definido como um conjunto de dados que consiste em uma série de localizações de pontos, irregularmente distribuídos na região de estudo e gerados por alguma forma de mecanismo estocástico (BAD-

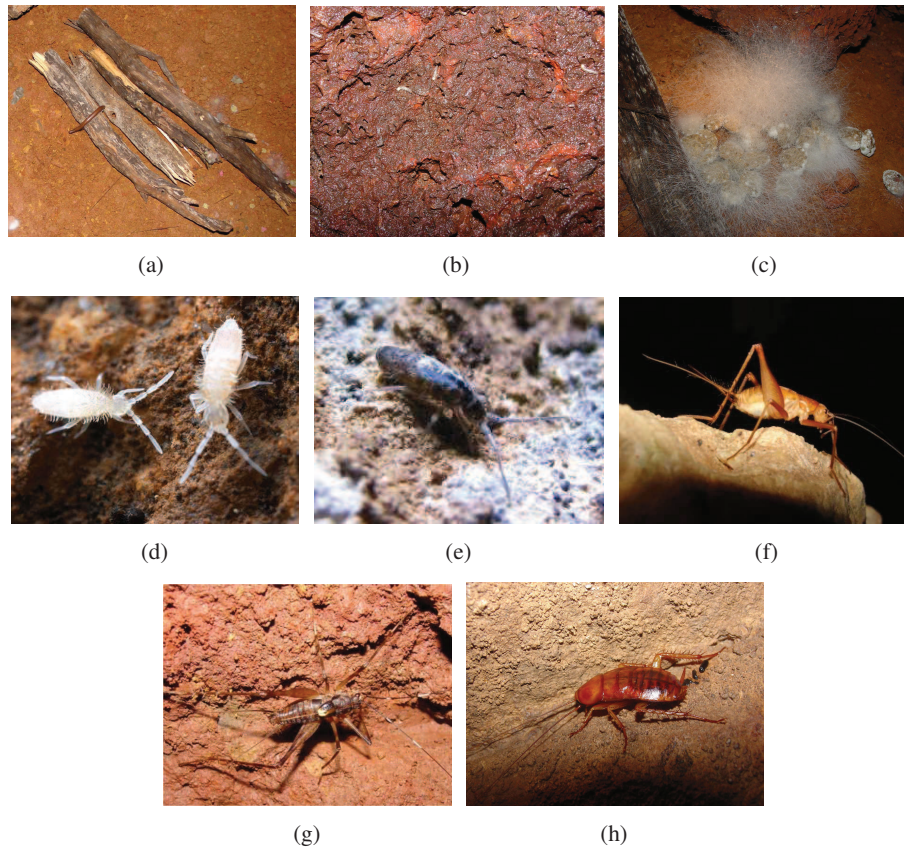


Figura 3 Base trófica da teia alimentar proposta: matéria orgânica, como troncos (a); depósito de guano (b) e fungos (c). Espécies detritívoras generalistas: Entomobryidae sp. (d), Collembola sp. (e), *Endecous sp.* (f), *Eidmanacris sp.* (g) e Blattodea sp. (h)
Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

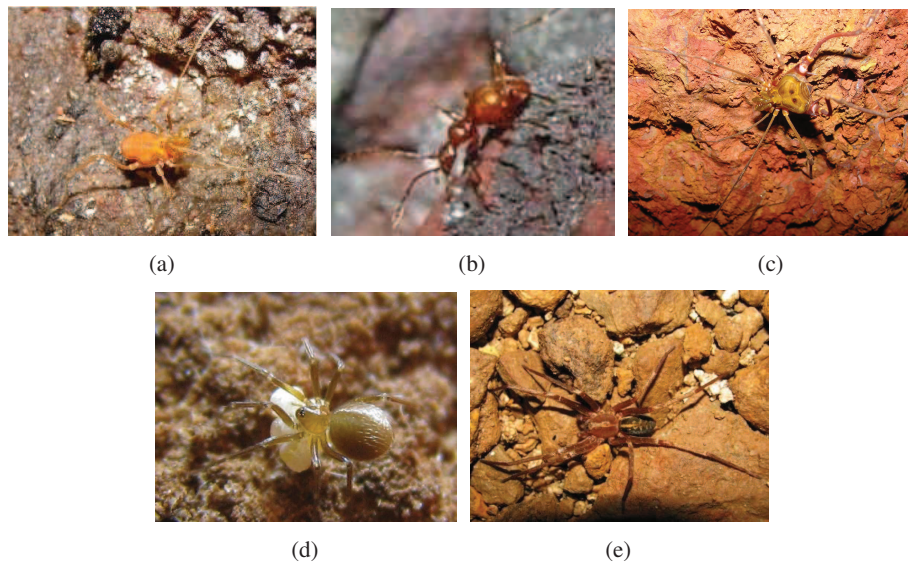


Figura 4 Espécies onívoras: *Gonyleptidae* sp. (a), *Pselaphinae* sp1 (b) e *Goniosoma vatrax* (c). Espécies predadoras: *Theridiidae* sp. (d) e *Isoctenus* sp. (e)

Fonte: Rodrigo Lopes Ferreira

DELEY, 2010; BAILEY; DIGGLE, 2013; GATRELL et al., 1996). Um exemplo desse tipo de dados é a localização de indivíduos de uma determinada espécie.

Um processo pontual descreve um processo estocástico como um variável aleatória que representa a localização de um evento no espaço (WALLER; GOTWAY, 2004). Esse processo estocástico pode ser caracterizado por suas propriedades de primeira e segunda ordem.

As propriedades de primeira ordem correspondem às variações no valor médio do processo estocástico no espaço, ou seja, estão relacionadas com a intensidade do processo (CÂMARA et al., 2002). Esta é definida como a densidade média dos pontos, isto é, o número esperado de pontos por unidade de área (BADDELEY, 2010). Essa medida permite descrever o caminho, pelo qual o valor esperado (média) do processo estocástico varia através do espaço (GATRELL et

al., 1996). A função intensidade, segundo Cressie (1991), pode ser definida da seguinte forma:

$$\lambda_a(x) \equiv \frac{Pr(N(x,a) > 0)}{a^2} \quad (2.1)$$

na qual $\lambda_a(x)$ corresponde à intensidade em um quadrado de lado a ; $N(x,a)$ é o número de ocorrências do evento de interesse, no caso, ocorrência de um indivíduo de uma determinada espécie, em um quadrado de dimensões axa centrado em um ponto x (Figura 5) e $Pr(N(x,a) > 0)$ é a probabilidade de que exista pelo menos um evento na área.

Considerando o limite de $\lambda_a(x)$, quando a tende a zero, tem-se a intensidade do processo pontual representada por $\lambda(x)$ (Equação 2.2):

$$\lim_{a \rightarrow 0} \lambda_a(x) = \lambda(x) \quad (2.2)$$

Um dos estimadores de intensidade pontual é o Estimador de Intensidade de Kernel. Este corresponde a uma função que realiza uma contagem de todos os pontos no interior de uma região de influência e estes são ponderados pela distância de cada um à localização de interesse (CÂMARA et al, 2002).

As propriedades de segunda ordem representam a dependência espacial do processo, proveniente da estrutura de correlação espacial. Elas descrevem a covariância ou correlação entre valores do processo pontual em diferentes regiões do espaço (GATRELL et al., 1996). A investigação dessas interações pode ser feita utilizando a função K, que foi proposta por Ripley (1977) (Equação 2.3). Nessa função, cada um dos eventos é visitado e é construído um conjunto de círculos concêntricos ao redor desse evento. O número cumulativo de eventos em cada uma dessas distâncias é contado e então estima-se a função K para cada um dos

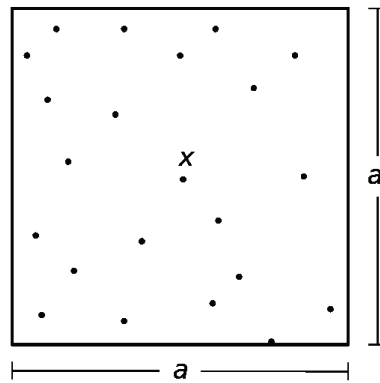


Figura 5 Ilustração da definição de intensidade

raios t considerados (BAILEY; GATRELL, 1995) (Figura 6).

$$K(t) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \int_0^t \lambda^2(x) x dx \quad (2.3)$$

na qual $\lambda(x)$ corresponde à função de intensidade de primeira ordem, indicando a intensidade do processo na localização x e t é o raio de alcance da correlação espacial. Nesse caso, pode-se obter os seguintes padrões espaciais: aleatório, agregado ou *cluster* e regular.

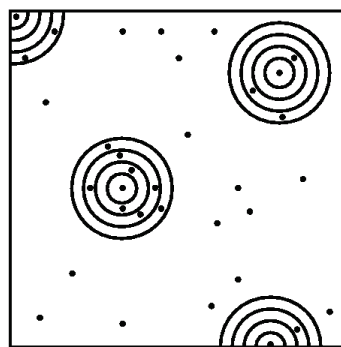


Figura 6 Estimação da função K

Quando tem-se informações adicionais para cada ponto em um padrão de pontos espacial, essa informação é chamada de marca. Assim, tem-se um padrão de pontos marcado (BADDELEY, 2010). Nesse caso, pode-se investigar as interações espaciais entre os diferentes tipos de pontos. Estas podem ser independência, atração ou repulsão. Para estimar essas interações, pode-se utilizar a função *K cross* (BAILEY; GATRELL, 1995).

O primeiro passo da análise de padrão de pontos realizado nesse trabalho foi a visualização do padrão de pontos espacial. Para essa visualização foram utilizados mapas de pontos, que segundo Baddeley (2010), permitem uma impressão inicial do formato da região de estudo e também de possíveis padrões presentes na distribuição dos eventos. Perry et al. (2002) também destacam o uso de técnicas de visualização simples para as análises iniciais.

Após a visualização espacial dos dados, uma das primeiras etapas de análise de processos pontuais é a análise das propriedades de primeira e segunda ordem, que caracterizam processos estocásticos. As propriedades de primeira ordem foram estimadas por meio do Estimador de Intensidade de Kernel. Já as propriedades de segunda ordem foram analisadas por meio de estimativas para a função *K*. Para a investigação das interações espaciais entre as espécies foi utilizada a função *K cross*. Tanto para a função *K* quanto para a função *K cross*, foram realizados testes de Monte Carlo para Completa Aleatoriedade Espacial (CAE). Esse teste é baseado em simulações da hipótese nula, ou seja, de que o padrão de pontos é uma realização de completa aleatoriedade espacial. Nesse teste, foram geradas 5.000 simulações de CAE dentro da região de estudo, a caverna, para cada estimativa das funções. Dentre essas simulações, são selecionadas as curvas superiores e inferiores que delimitam uma área, na qual o processo pontual é considerado aleatório. No caso da função *K cross*, essa área corresponde à independência entre os tipos

de pontos avaliados (BADDELEY, 2010), nesse caso, entre as espécies.

Todas as análises de padrões de pontos foram realizadas no *software* R, utilizando o pacote *Spatstat* (BADDELEY; TURNER, 2005).

3 RESULTADOS

De forma geral, o ambiente físico da galeria artificial mostrou-se estável, os valores de temperatura e umidade sofreram pequenas variações. Com relação as interações entre as espécies, observou-se uma predominância de relações de atração em relação àquelas de repulsão. As espécies analisadas apresentaram, na maioria dos monitoramentos, padrão agregado.

Na Figura 7, são indicados os valores de umidade e temperatura medidos no interior da galeria, durante os vinte e cinco monitoramentos executados, destacando-se as inspeções detalhadas. Os meses mais secos compreenderam de Maio a Setembro. A galeria, nestes períodos, apresentou temperatura média de 18,50°C e umidade relativa média correspondente a 82,10%. Nos períodos chuvosos, a cavidade artificial apresentou temperatura e umidade médias de 20,60°C e 92,70%, respectivamente.

A temperatura mostrou-se bastante estável durante todos os monitoramentos, não sendo observadas alterações bruscas em seus valores (Figura 7). Seu valor médio, ao longo dos monitoramentos, foi de 19,70°C. O menor valor observado corresponde a 17,00°C, em Julho de 2006, e o maior valor a 23,00°C, observado em Dezembro de 2004 (Tabela 1). Percebe-se, que a temperatura sofreu uma pequena redução durante os períodos mais secos, porém a amplitude térmica observada é relativamente pequena.

A umidade relativa foi o parâmetro toclimático de maior variação (Figura 7), seu valor médio, ao longo de todos os monitoramentos, foi de 88,40%. O menor valor observado corresponde a 76,00%, em Agosto de 2005, e os maiores valores a 98,00%, observados em Dezembro de 2004 (Tabela 1) e Março de 2006 (Tabela 2). Percebe-se que os maiores valores de umidade ocorreram durante as estações

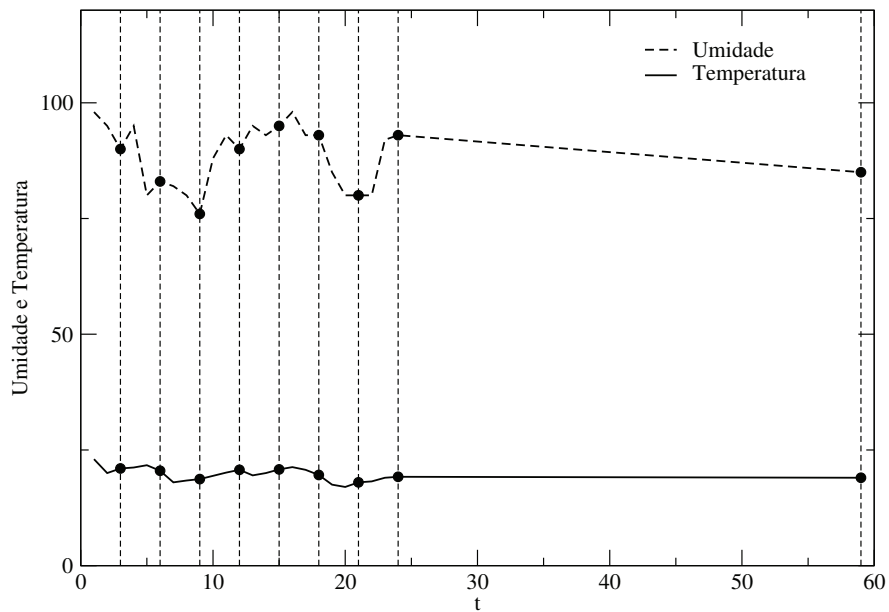


Figura 7 Variação temporal das variáveis topoclimáticas umidade e temperatura. Os monitoramentos detalhados estão destacados por círculo e linhas pontilhadas

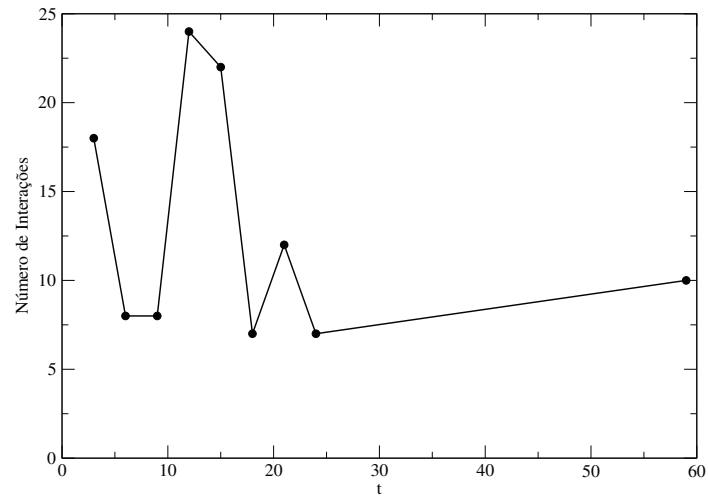
chuvosas.

As Figuras 11, 12, 13 e 14 representam um resumo de todas as análises espaciais de padrão de pontos realizadas para as dez espécies selecionadas. Nelas são apresentados os resultados das análises espaciais univariadas, nas quais buscou-se entender o padrão espacial apresentado por cada espécie. Já as análises multivariadas, foram realizadas com o objetivo de compreender se as espécies estão espacialmente correlacionadas. Nas Figuras 11 e 12, com relação as análises multivariadas, são apresentadas as relações espaciais de aleatoriedade, atração e repulsão, enquanto que nas Figuras 13 e 14, consideram-se apenas as duas últimas. Ressalta-se que, nessas figuras, as espécies que não apresentaram coloração e nem *links* de interação, não possuíram número mínimo suficiente de indivíduos

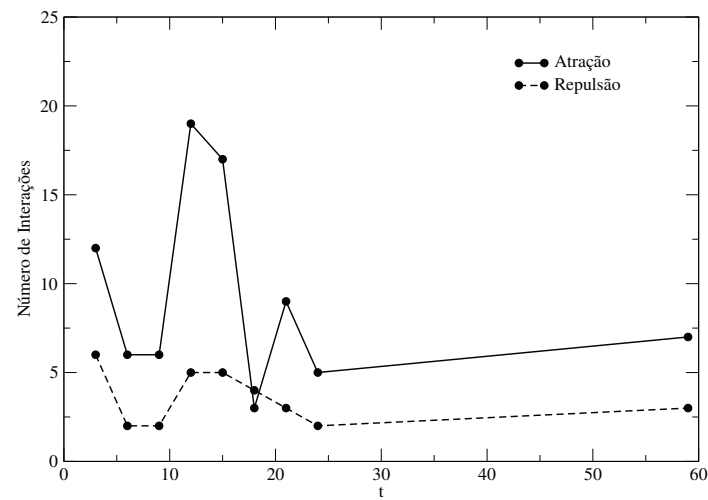
para cálculo da função K e função K *cross*, respectivamente. Nessas figuras, foram considerados: *END* - *Endecous sp.*, *EID* - *Eidmanacris sp.*, *ENT* - Entomobryidae sp., *COL* - Collembola sp., *BLA* - Blattodea sp., *GON* - *Goniosoma vatrax*, *ISO* - *Isoctenus sp.*, *THE* - Theridiidae sp., *PSE* - Pselaphinae sp1 e *GONY* - Gonyleptidae sp.

Na Figura 8(a), foi apresentada a variação temporal do número de interações espaciais estabelecidas entre as espécies ao longo dos monitoramentos detalhados. Nesse caso, o número de interações representa o somatório das relações espaciais de atração e repulsão. As inspeções que apresentaram o maior número de interações foram as realizadas em Fevereiro de 2005 (18 interações), Novembro de 2005 (24 interações) e Fevereiro de 2006 (22 interações). Essas foram realizadas em períodos chuvosos. Em contrapartida, após o período chuvoso, isto é, na seca, observou-se uma redução no número de interações. Portanto, durante o primeiro ano de monitoramento, pode-se observar uma nítida tendência a uma resposta sazonal da comunidade. Essa variação sazonal também pode ser observada nas Figuras 13 e 14, nas quais é representada a variação no número de relações espaciais ao longo dos nove monitoramentos detalhados, considerando apenas as interações de atração e repulsão. Quando as interações aleatórias são consideradas, esse padrão também se mantém (Figuras 11 e 12). Porém, durante o segundo ano de monitoramento, esse padrão sazonal não foi observado. Houve uma redução no número total de interações do monitoramento realizado em Agosto de 2006 (12 interações), seca, para o realizado em Novembro de 2006 (7 interações), início do período chuvoso (Figura 8(a)).

O número total de interações espaciais (Figura 8(a)) pode ser dividido em interações de atração e repulsão (Figura 8(b)). Analisando-se a Figura 8(b), observa-se que, na maioria dos monitoramentos, houve um número maior de atra-



(a)



(b)

Figura 8 Relações espaciais estabelecidas entre as espécies, considerando apenas os monitoramentos detalhados. Em (a), observa-se a variação temporal no número total de interações e em (b), estas estão subdivididas em atrações (linha preenchida) e repulsões (linha pontilhada)

ções do que repulsões. Percebe-se também que há um aumento no número dos dois tipos de interações de Agosto de 2005 (6 atrações e 2 repulsões), período seco, para Novembro de 2005 (19 atrações e 5 repulsões), período chuvoso. Porém, as relações de atração apresentaram uma taxa de aumento maior do que as de repulsão.

Na Figura 9, são apresentados os resultados da análise de processos pontuais para a espécie *Collembola* sp. ao longo do monitoramento 21, realizado em Agosto de 2006. Primeiramente, pode-se observar o mapa de pontos (Figura 9(a)), no qual é possível visualizar o formato da cavidade e a distribuição espacial dos indivíduos dessa espécie no monitoramento considerado. Com relação a investigação da intensidade (Figura 9(b)), percebe-se que esta não é homogênea, ou seja, varia de localização para localização na região estudada. Além disso, nota-se a tendência de formação de agrupamentos, duas regiões com maior concentração de indivíduos. Essa tendência é comprovada pela análise da função K. Na Figura 9(c), pode-se observar que a função K calculada para os dados observados apresentou valores maiores do que a mesma função, considerando que os dados apresentassem Distribuição de Poisson. Quando foi analisada a influência das localizações da espécie de *Collembola* sp. sobre as localizações das espécies de *Theridiidae* sp., observou-se uma interação de repulsão (Figura 9(d)). Nesse caso, os indivíduos dessas duas espécies tendem a se repelir.

Os mapas de pontos e intensidade revelaram que a espécie *Goniosoma vatrax* apresenta distribuição espacial associada à entrada da galeria. Como exemplo, são apresentados os resultados referentes as análises espaciais dessa espécie no monitoramento 15 (Figura 10). Nesse monitoramento, foi observado que essa espécie apresenta uma relação de atração com a espécie *Eidmanacris* sp. (Figura 10(c)) e repulsão com *Endecous* sp. (Figura 10(d)). Esse padrão também se repe-

tiu nos demais monitoramentos. No monitoramento 3, correspondente ao período chuvoso, *Endecous sp.* apresentou distribuição espacial concentrada no meio e interior da cavidade. Já *Eidmanacris sp.* e *Goniosoma vatrax* concentraram-se na entrada (Figura 15). No próximo monitoramento, início do período seco, *Eidmanacris sp.* apresentou um núcleo de concentração no interior da cavidade (Figura 15). Já no monitoramento seguinte, correspondente a seca, *Endeous sp.* e *Eidmanacris sp.* concentraram-se no fundo da galeria, apresentando interação de atração (Figura 13(c)). No monitoramento 12, período chuvoso, as três espécies voltaram a exibir a configuração apresentada no 3º monitoramento. Na próxima inspeção, *Eidmanacris sp.* voltou a apresentar núcleo de concentração de indivíduos no interior da galeria, estabelecendo assim, uma relação de atração com *Endecous sp.* (Figura 13(e)). No monitoramento 18, a espécie *Endecous sp.* concentrou-se na região mediana da cavidade e *Eidmanacris sp.* apresentou dois núcleos de concentração, na entrada e no final da galeria (Figura 15). Tal configuração manteve-se semelhante no monitoramento 21 (Figura 16). Já no monitoramento 24, retornou-se a configuração típica de períodos chuvosos, *Endecous sp.* distribuído na região mediana e interior da galeria e a população de *Eidmanacris sp.* e *Goniosoma vatrax* concentrada na entrada. No último monitoramento, ocorreu um fato atípico, *Endecous sp.* concentrou-se na entrada da cavidade (Figura 16).

Com relação as interações univariadas, a maioria das espécies apresentaram relações de atração (Figuras 11, 12, 13 e 14). Como exemplo, pode-se citar a espécie *Goniosoma vatrax*, que como relatado anteriormente, sempre apresentou núcleos de concentração de indivíduos próximos a entrada da cavidade. Destaca-se também a espécie predadora de topo *Isoctenus sp.* que na grande maioria dos monitoramentos detalhados exibiu padrão de aleatoriedade.

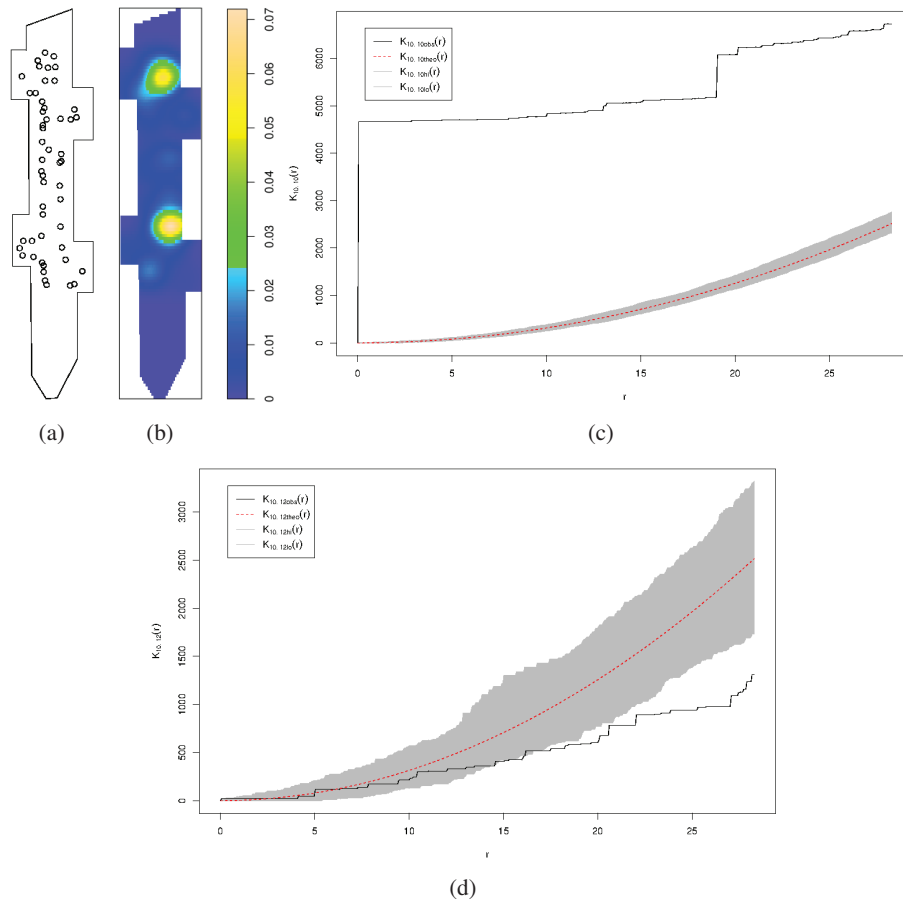


Figura 9 Análise espacial de padrão de pontos para a espécie *Collembola* sp. durante o monitoramento 21. Mapa de pontos (a) e intensidade - Estimador de Intensidade de Kernel (b). Em (c), são apresentadas as curvas limítrofes superior e inferior que delimitam o envelope da função K simulada, a região entre as curvas limítrofes é preenchida; - - corresponde à função K, considerando a Distribuição de Poisson teórica e — é a Função K calculada para os dados observados. Em (d), são apresentadas as estimativas da função K *cross*, considerando a interação entre as espécies *Collembola* sp. e *Theridiidae* sp., que estabelecem uma interação ecológica de predação

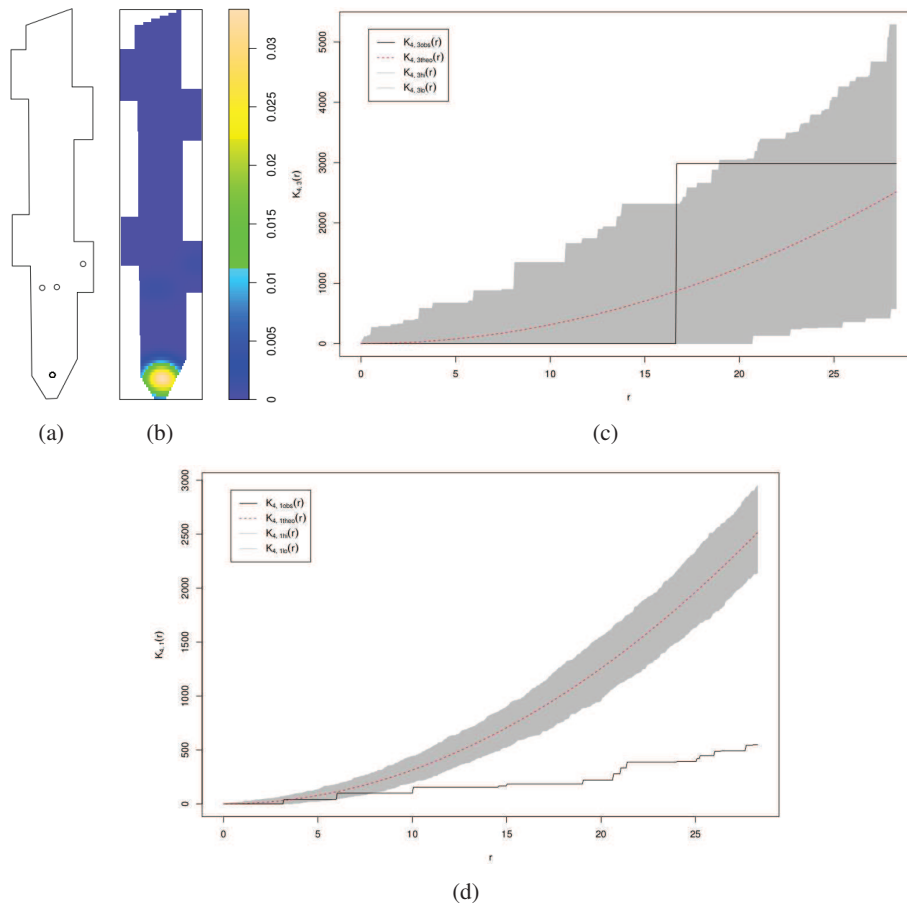


Figura 10 Análise espacial de padrão de pontos para a espécie *Goniosoma vatrax* durante o monitoramento 15. Mapa de pontos (a) e intensidade - Estimador de Intensidade de Kernel (b). Em (c) e (d), são apresentadas as estimativas da função K *cross*, considerando a interação entre as espécies *Goniosoma vatrax* e *Eidmanacris sp.* e *Goniosoma vatrax* e *Endecous sp.*, respectivamente

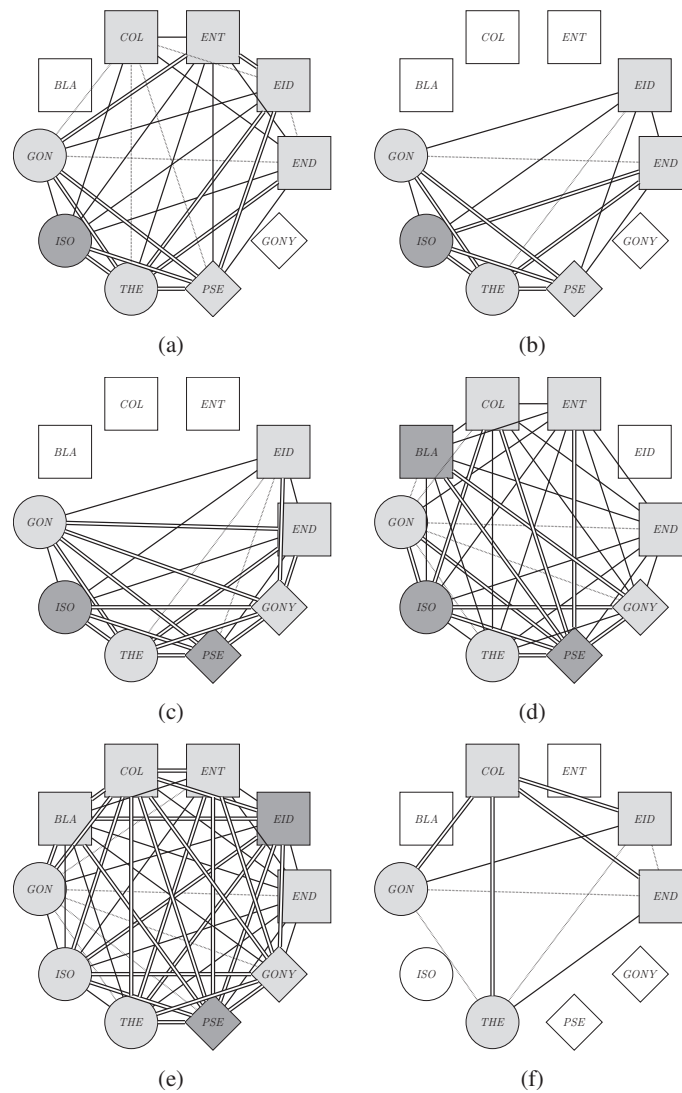


Figura 11 Interações estabelecidas entre as espécies analisadas nos monitoramentos detalhados 3, 6, 9, 12, 15 e 18. Análise univariada (coloração cinza claro representa padrão agregado e cinza escuro aleatório). Análise multivariada (= independência, — atração e - - repulsão). As espécies detritívoras generalistas foram representadas pelo símbolo \square , as espécies onívoras \diamond e as espécies predadoras por \circ

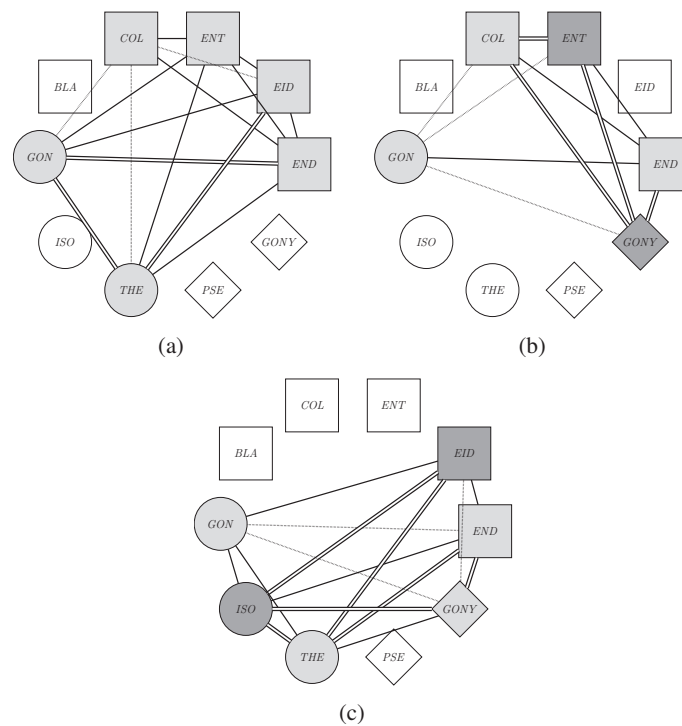


Figura 12 Interações estabelecidas entre as espécies analisadas nos monitoramentos detalhados 21, 24 e 25. Análise univariada (coloração cinza claro representa padrão agregado e cinza escuro aleatório). Análise multivariada (= independência, — atração e - - repulsão). As espécies detritívoras generalistas foram representadas pelo símbolo □, as espécies onívoras ◇ e as espécies predadoras por ○

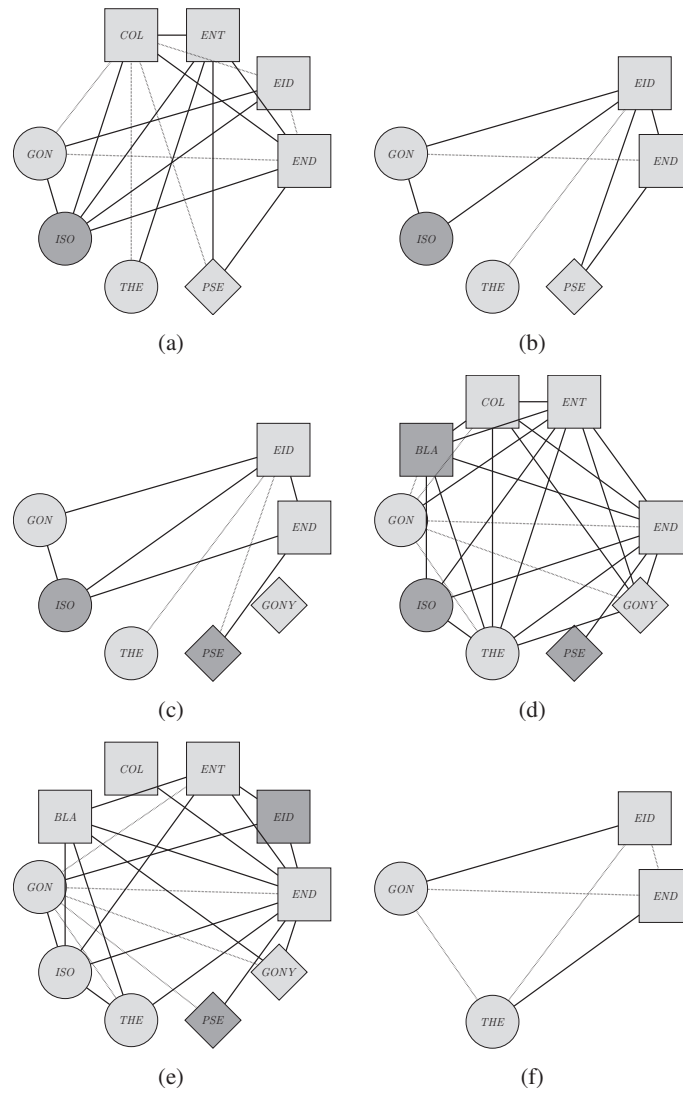


Figura 13 Interações estabelecidas entre as espécies analisadas nos monitoramentos detalhados 3, 6, 9, 12, 15 e 18. Análise univariada (coloração cinza claro representa padrão agregado e cinza escuro aleatório). Análise multivariada (— atração e - - repulsão). As espécies detritívoras generalistas foram representadas pelo símbolo □, as espécies onívoras ◇ e as espécies predadoras por ○

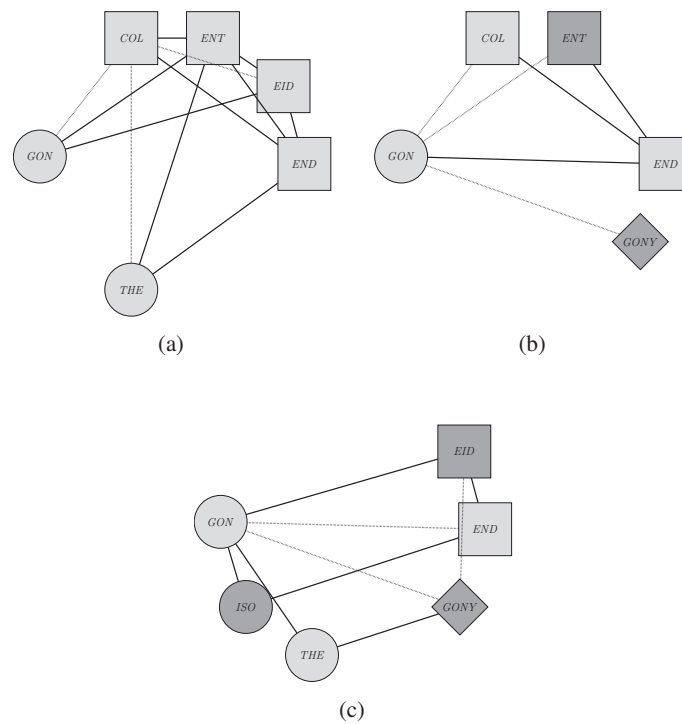


Figura 14 Interações estabelecidas entre as espécies analisadas nos monitoramentos detalhados 21, 24 e 25. Análise univariada (coloração cinza claro representa padrão agregado e cinza escuro aleatório). Análise multivariada (— atração e - - repulsão). As espécies detritívoras generalistas foram representadas pelo símbolo □, as espécies onívoras ◇ e as espécies predadoras por ○

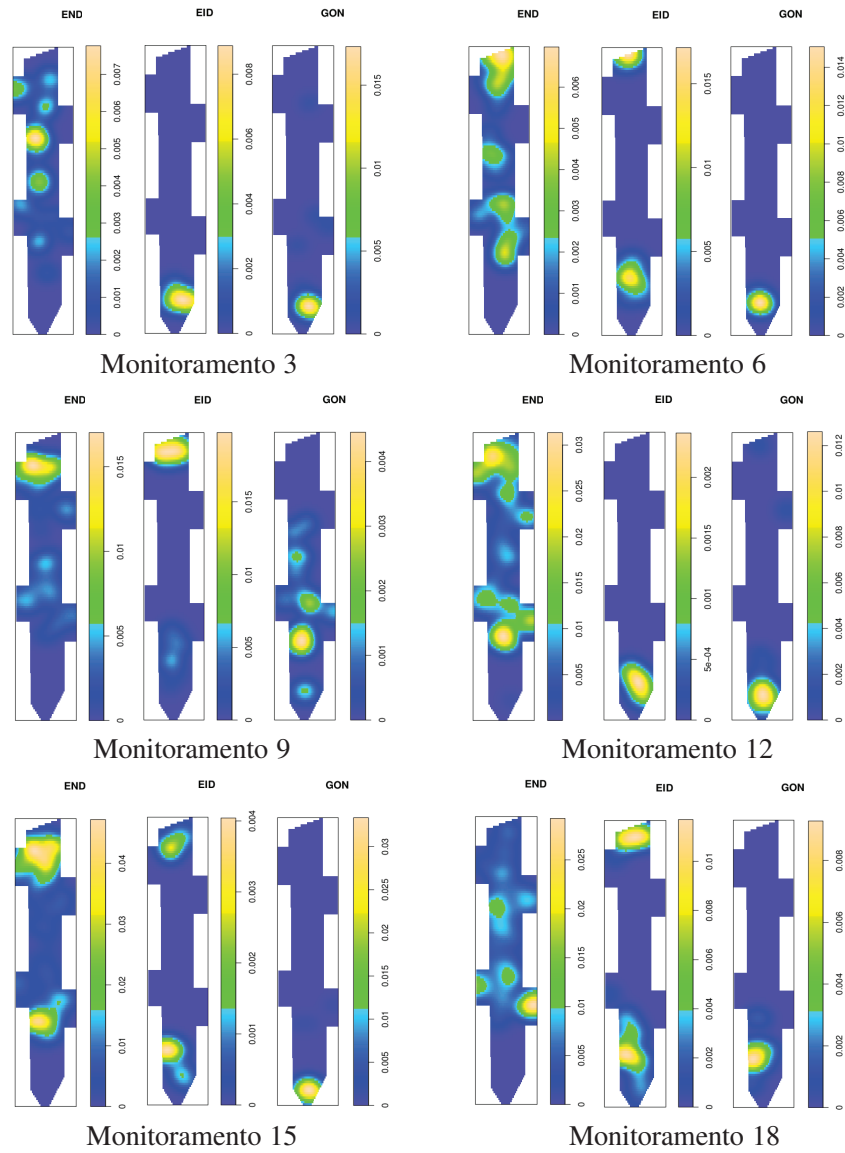


Figura 15 Mapas de intensidade das espécies *Endecous sp.* (END), *Eidmanacris sp.* (EID) e *Goniosoma vatrax* (GON) nos monitoramentos 3, 6, 9, 12, 15 e 18

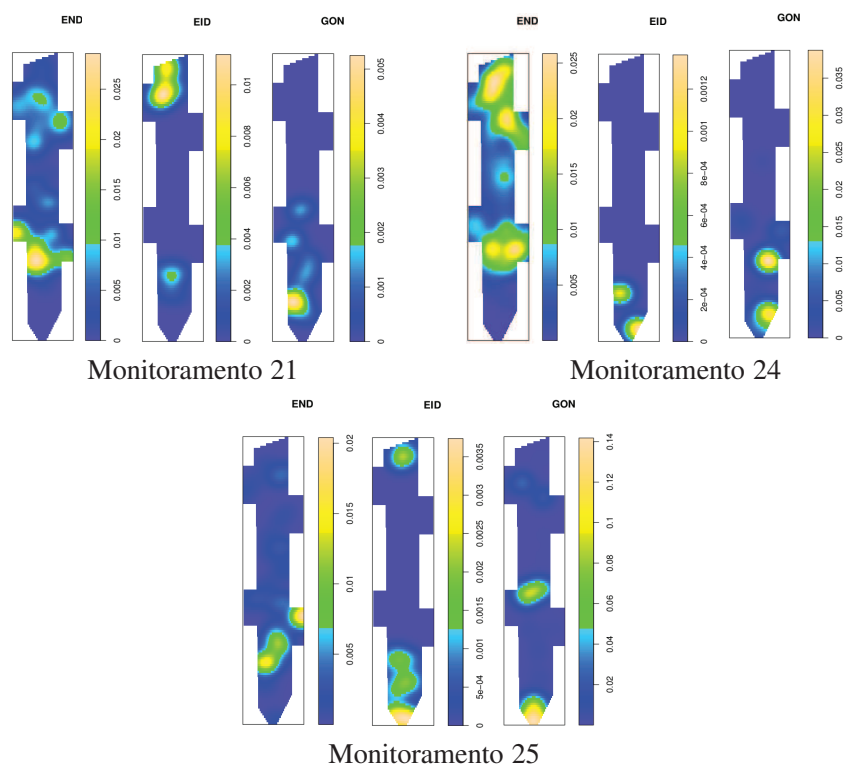


Figura 16 Mapas de intensidade das espécies *Endecous sp.* (END), *Eidmanacris sp.* (EID) e *Goniosoma vatrax* (GON) nos monitoramentos 21, 24 e 25

4 DISCUSSÃO

Os padrões espaciais observados podem ser explicados pelas condições sazonais, quantidade e distribuição de recursos e preferência por microhabitats, como será discutido à frente.

O ambiente cavernícola é caracterizado por elevada umidade, que frequentemente apresenta tendência à saturação (HOWARTH, 1983; POULSON; WHITE, 1969). Essa característica foi confirmada para a galeria artificial, uma vez que esta apresentou elevados valores de umidade relativa do ar, mesmo em períodos de seca. A maioria dos valores registrados foram superiores a 80% (Tabelas 1 e 2). Característica esta destacada por Ferreira (2005) em sistemas subterrâneos ferruginosos, que mesmo em estações secas apresentam umidade considerável nas regiões mais interiores das cavidades, geralmente acima de 80%. Apesar da galeria artificial possuir uma pequena extensão, o que a levaria a apresentar um elevado controle externo sobre sua atmosfera (FERREIRA, 2005), esse fato não foi observado. Além da estabilidade com relação a umidade, esta manteve valores elevados, a temperatura apresentou variações temporais de baixa amplitude. Em sistemas cavernícolas ferruginosos, as temperaturas tendem a apresentar padrões razoáveis de estabilidade (FERREIRA, 2005). Geralmente, os valores de temperatura, nesses sistemas, aproximam-se da média anual das temperaturas da região (BARR, 1967; BARR; KUEHNE, 1971; POULSON; WHITE, 1969).

Portanto, o ambiente construído apresentou elevada estabilidade ambiental. Acredita-se que essa estabilidade observada no sistema analisado esteja relacionada com o fato da cavidade ter apenas uma abertura e chapas de aço dispostas alternadamente ao longo de sua extensão. A construção da galeria começou pela região que seria o fundo da cavidade e esta depois foi fechada. Se a galeria fosse

mantida com duas entradas, seria criado um túnel de vento que alteraria constantemente a atmosfera da cavidade, impossibilitando a sua estabilização topoclimática. Além disso, a instalação das chapas de aço impediram a passagem direta de luz refletida da entrada, fazendo com que boa parte da galeria, mesmo retilínea fosse afótica. Segundo Culver (1982) e Poulson e White (1969), essa elevada estabilidade do ambiente cavernícola é devido à ausência permanente de luz e temperatura e umidade constantes. Como é destacado por Poulson e White (1969), o clima nesse ambiente é classificado como estável e de fácil definição, sendo muito menos variável do que em ambientes epígeos.

Como relatado por Ferreira (2005), a base trófica de grutas no complexo Capão Xavier é composta principalmente por raízes de planta de vegetação externa. Porém, as plantas que foram transplantadas para a superfície da cavidade, durante a construção da galeria artificial, não apresentaram crescimento significativo de suas raízes, apenas no último monitoramento, realizado em Outubro de 2009. Assim, acredita-se que a base trófica do sistema analisado seja composta principalmente por matéria orgânica carreada por agentes físicos e biológicos e depósitos de guano de *Glossophaga sp.*, espécie de morcego nectarífero registrada nas inspeções. O transporte de materiais orgânicos particulados por meio de águas superficiais, ocorre em diversas cavernas, principalmente calcárias. Porém, essa não é uma das principais formas de importação de recursos para as cavidades do complexo de Capão Xavier, uma vez que estas apresentam, em sua grande maioria, conduto ascendente a partir da entrada (FERREIRA, 2005). Apesar desta característica natural desses sistemas, a galeria artificial apresentou conduto descendente com relação a entrada, favorecendo esse tipo de importação.

Como descrito anteriormente nos resultados, foi observado um aumento da complexidade da comunidade analisada nos períodos chuvosos durante o primeiro

ano de monitoramento. Nesse caso, considerando que a definição de complexidade está relacionada às interações (ANAND; ORLÓCI, 2000; JANZEN, 1988; MYERS, 1992). Esse aumento da complexidade pode ser justificado pelo fato de que a chuva aumenta a disponibilidade de alimento na caverna, por carrear recursos para o seu interior (SIMON; BENFIELD; MACKO, 2003; SOUZA-SILVA et al., 2007, 2012; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Souza-Silva et al. (2012) apresentaram em seus resultados que as maiores taxas de importação de detritos para o meio hipógeo ocorreram nos períodos com maior quantidade de chuva e as taxas mais baixas coincidiram com os períodos de menores quantidades de chuva. Com relação aos depósitos de guano, Souza-Silva; Martins e Ferreira (2011), em seu trabalho sobre dinâmicas tróficas em uma caverna calcária neotropical, observaram que a maior deposição de guano ocorreu no mês de Fevereiro, coincidindo com o período mais chuvoso. Uma maior quantidade de recursos atrai um número maior de detritívoros e estes, por sua vez, atraem mais predadores e conseqüentemente um número maior de interações ecológicas e espaciais. Por outro lado, nos períodos secos, como há um menor aporte de nutrientes para a cavidade, há uma redução no número de interações. Souza-Silva et al. (2012) relatam que os maiores valores de riqueza e abundância de invertebrados coincidiram com a alta quantidade de matéria orgânica acumulada nas redes de contenção. Os autores ressaltam que essa matéria orgânica é utilizada como abrigo e alimento para muitos invertebrados.

Os resultados aqui apresentados também revelaram que esse padrão sazonal não foi observado no segundo ano de monitoramento. Entretanto, não se pode afirmar que essa tendência sazonal tenha sido realmente inexistente. O monitoramento realizado em Novembro de 2006 ocorreu no início das chuvas e não houve um monitoramento posterior correspondente ao meio do período chuvoso,

que poderia ter apresentado um aumento no número total de interações.

Na comunidade analisada, houve um predomínio de relações espaciais de atração quando comparadas às de repulsão. Diante deste padrão, levanta-se o seguinte questionamento: por que existem mais atrações do que repulsões? Para responder essa questão, considere o seguinte modelo teórico. Cavernas são por definição ambientes oligotróficos, ou seja, com pouca disponibilidade de recursos (CULVER, 1982; SIMON; PIPAN; CULVER, 2007). Se o recurso é um fator limitante, então espera-se que os animais se agrupem onde existam recursos disponíveis. Tal fato, conseqüentemente, leva a uma predominância de interações de atração. Por outro lado, segundo esse modelo teórico, um ambiente com quantidade de recurso abundante favoreceria as interações de repulsão. Se existem recursos em abundância, para que uma espécie vai se aproximar da outra, se não for uma interação necessária? A atração entre duas espécies pode significar um perigo, devido ao aumento da probabilidade de transmissão de doenças, predação, exclusão devido a competição, entre outros. Logo, em um sistema com abundância de recursos, haveria um predomínio de interações espaciais de repulsão. Assim, na estação chuvosa, quando há um aumento da quantidade de recursos, seria esperado uma tendência à predominância das interações de repulsão frente às de atração, segundo o modelo teórico aqui proposto. Entretanto, isso não foi observado, visto que o número de atrações é maior do que os de repulsões na maioria dos monitoramentos. Tal fato ocorre, porque não é apenas a quantidade de recurso que influencia o número de relações de atração e repulsão, mas também sua distribuição espacial. Se o recurso é distribuído na cavidade de forma uniforme, isso favorece as repulsões. Por outro lado, se o recurso apresenta uma distribuição agregada, mesmo sendo abundante, favorece o agrupamento dos indivíduos, ou seja, as interações de atração. No caso estudado, a arquitetura da cavidade construída levou a

uma tendência à formação de manchas de recurso durante os períodos chuvosos. O sistema de drenagem de água construído no piso da galeria para evitar a sua completa inundação leva a uma lixiviação diferenciada de recursos, que são removidos de certas áreas, concentrando-se em outras. Portanto, apesar do período chuvoso resultar em um aumento da quantidade de recurso, este não se distribuiu de forma homogênea pela cavidade, favorecendo as interações de atração.

A atração pode ser produto de dois fatores. Um deles são as interações ecológicas, ou seja, espécies apresentam padrão de atração devido às relações ecológicas estabelecidas entre elas, como competição e predação. Porém, as espécies podem apresentar atração devido a outro fator, a preferência por microhabitats. Durante o período seco, as interações de atração na cavidade podem ocorrer devido à preferências por microhabitats mais úmidos. Essa condição pode atrair as espécies, resultando no padrão de atração. Já nos períodos chuvosos, a cavidade inteira apresenta elevada umidade. Assim, nesse período, o principal fator atuante no favorecimento das interações de atração, são realmente as interações ecológicas, além da quantidade e distribuição de recursos como anteriormente discutido.

A espécie de aranha Theridiidae sp. é predadora das duas espécies de colêmbolos analisadas, Entomobryidae sp. e Collembola sp. (Figura 2). As duas espécies de presa, no monitoramento realizado em Agosto de 2006, apresentaram uma relação de atração (Figura 14(a)), portanto elas tendem a ocupar locais próximos. Característica justificada pelo fato de colembôlos serem organismos classificados como detritívoros generalistas. Como nesse sistema os recursos são raros e encontram-se distribuídos em manchas, Colembola sp. e Entomobryidae sp. tendem a se atrair espacialmente, uma vez que são competidores. Entretanto, a espécie predadora apresenta atratividade com Entomobryidae sp. e repulsividade com Collembola sp, no 21º monitoramento (Figura 14(a)). Acredita-se que esse

fato possa refletir a diferença entre forças de interações estabelecidas entre o predador e suas presas, ou seja, preferência alimentar. Como as duas presas estão presentes em uma mesma localidade, Theridiidae sp. alimenta-se preferencialmente, nesse monitoramento, da espécie de Entomobryidae sp., pois seus pontos de ocorrência estão mais próximos dessa espécie. Esse padrão se repetiu em dois monitoramentos, o 3º e o 21º, que correspondem aos maiores picos de abundância da espécie de Collemba sp. No monitoramento 3, a população de Collembola sp. foi 9,5 vezes maior do que a população de Entomobryidae sp. e no monitoramento 21, 13,5 vezes maior. Tal fato confirma a preferência alimentar da espécie predadora. Ainda são necessários futuros experimentos com estas espécies para realmente comprovar essa preferência alimentar, pois esta é uma aranha com comportamento do tipo “senta e espera”. Assim, pode-se pensar como ela apresenta essa preferência alimentar se ela faz teias e só se desloca quando alimentos não chegam a sua teia ou no caso dos machos, na época reprodutiva. Nesse caso, as interações espaciais de atração e repulsão podem ser explicadas pelas interações ecológicas estabelecidas entre essas espécies.

A espécie *Goniosoma vatrax* não apresenta interações ecológicas diretas com *Endecous sp.* e nem com *Eidmanacris sp.* Porém, sua distribuição espacial sempre está associada positivamente com a de *Eidmanacris sp.* Esse fato pode ser justificado pela preferência por microhabitats. *Goniosoma vatrax* é uma espécie troglóxena que apresenta distribuição próxima às entradas das cavernas, característica esta comum a opiliões troglóxenos (FERREIRA et al., 2005; MACHADO; FERREIRA; MARTINS, 2003; GNASPINI, 1996; PINTO-DA-ROCHA, 1993). *Eidmanacris sp.* é uma espécie de grilo mais tolerante à dessecação do que *Endecous sp.*, logo, também apresenta uma distribuição espacial mais próxima à entrada da cavidade. Mesmo, nos períodos de seca, nos quais *Eidmanacris sp.* retrai sua

distribuição, concentrando-se mais na região mediana e interior da cavidade, ela ainda apresenta uma relação espacial de atratividade com *Goniosoma vatrax*, pois este em períodos muitos secos, também apresenta uma pequena tendência à retração, porém mantém sua concentração próxima a entrada. Como a outra espécie de grilo analisada, *Endecous sp.* concentra-se no interior da cavidade, suas localizações estão associada negativamente com as de *Goniosoma vatrax*.

Entre as duas espécies de grilo, *Eidmanacris sp.* é a mais tolerante a dessecação. Logo, esta mantém uma distribuição espacial mais próxima á entrada da galeria, como afirmado anteriormente. Nos períodos chuvosos, a segregação espacial observada entre as duas espécies é nítida, a população de *Endecous sp.* apresenta indivíduos concentrados na parte mediana e interior da cavidade e *Eidmanacris sp.* na parte inicial, próxima à entrada. Logo, nesses períodos, as duas espécies tendem a apresentar relações espaciais de repulsão. Característica justificada pelo fato dessas espécies serem competidoras. Porém, no período seco, mesmo *Eidmanacris sp.* sendo mais tolerante à seca, ele retrai sua distribuição espacial, habitando também a parte mais mediana e interior da cavidade. Nesse momento, há uma tendência de atração espacial entre as duas espécies. Portanto, os padrões espaciais, interações de atração ou repulsão, apresentados por *Endecous sp.* e *Eidmanacris sp.* são justificados por interações ecológicas e também por preferência por microhábitat.

O padrão de agregação apresentado pela maioria das espécies analisadas pode ser explicado pelo mesmo motivo da predominância de interações de atração, ou seja, pela quantidade e distribuição de recursos no meio cavernícola analisado. *Goniosoma vatrax* apresentou, em todos os monitoramentos analisados, comportamento de agregação. Esse comportamento já foi registrado na literatura para diversas espécies de opiliões (FERREIRA et al., 2005; MACHADO; FERREIRA; MARTINS, 2003; WILLEMART; GNASPINI, 2004) e pode ser justificado por

diferentes hipóteses, como seleção de hábitat, defesa contra predadores e diminuição da predação individual por efeito de diluição (HOLMBERG; ANGERILLI; LACASSE, 1984). Por outro lado, a espécie *Isoctenus sp.*, que é uma aranha cursorial, ou seja, ela tem comportamento de buscar suas presas, apresenta padrão aleatório. Existem dados na literatura de que a espécie *Ctenus fasciatus*, também pertencente ao gênero *Isoctenus*, não apresenta preferências definidas por substratos específicos, ocorrendo, portanto, em diferentes habitats no ambiente subterrâneo (TRAJANO; GNASPINI-NETTO, 1991). Logo, a espécie analisada apresenta uma ampla distribuição, não se concentrando em determinadas áreas. Esse fato pode ser o que justifica o comportamento de distribuição aleatória, apresentado pela espécie, na maioria dos monitoramentos detalhados.

Portanto, esse trabalho permitiu a caracterização espacial de dez espécies cavernícolas, analisadas separadamente e também considerando as interações ecológicas estabelecidas entre elas. Trabalhos futuros são necessários no sentido de complementar os conhecimentos aqui gerados, principalmente, enriquecendo os detalhes sobre a biologia e ecologia desses animais, fato que pode contribuir de forma expressiva para a modelagem desses dados. Espera-se que os conhecimentos aqui gerados contribuam para um melhor entendimento da dinâmica espacial e temporal dessas espécies e do ambiente, no qual elas vivem.

Atualmente, muitos esforços vem sendo feitos com o objetivo de conservar ambientes subterrâneos. Algumas pesquisas buscam propor áreas prioritárias para a conservação desses sistemas (SIMÕES, 2013; SOUZA, 2012; SOUZA-SILVA, 2008; ZAMPAULO, 2010) e também há a proposta do desenvolvimento de um índice de complexidade ecológica para auxiliar nas medidas de conservação e manejo de ambientes subterrâneos (FERREIRA, 2004). É fundamental conservar os sistemas subterrâneos e para isso é necessário o conhecimento não apenas do

ambiente físico, mas também da biologia das espécies e das interações que estas estabelecem entre si, com as demais espécies e com o meio em que vivem. Tais conhecimentos são capazes de melhorar a nossa compreensão sobre a dinâmica de sistemas cavernícolas e conseqüentemente contribuir para a elaboração de planos de conservação e manejo mais eficazes.

REFERÊNCIAS

- ANAND, M.; ORLÓCI, L. On hierarchical partitioning of an ecological complexity function. **Ecological Modelling**, v. 132, p. 51–62, 2000.
- BADDELEY, A. **Analysing spatial point patterns in R**. CSIRO, 2010. 232 p.
- BADDELEY, A.; TURNER, R. Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns. **Journal of Statistical Software**, v. 12, n. 6, p. 1–42, 2005.
- BAILEY, T. C.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Longman Scientific & Technical, 1995. 413 p.
- BARR, T. C. Observations on the ecology of caves. **American Naturalist**, v. 101, n. 992, p. 474–489, 1967.
- BARR, T. C.; KUEHNE, R. A. Ecological studies in the Mammoth Cave ecosystems of Kentucky. II. The Ecosystem. **Annales de Spéléologie**, v. 26, p. 47–96, 1971.
- CÂMARA, G. et al. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2002. 186 p.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. John Wiley & Sons, 1991. 900 p.
- CULVER, D. C. **Cave life evolution and ecology**. Cambridge/Massachusetts/-London: Harvard University, 1982. 189 p.
- CULVER, D. C. In: JUBERTHIE, C.; DECU, V. (Ed.). WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Academic Press, 2012. p. 743-748.
- DIGGLE, P. J. **Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns**. CRC Press, 2013. 267 p.
- FERREIRA, C. F. Análise de impactos ambientais em terrenos cársticos e cavernas. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 123–148.
- FERREIRA, R. L. **A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos**. 2004. 120 p. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea em campos ferruginosos. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 106–115, jul. 2005.

FERREIRA, R. L. Biologia Subterrânea. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 89–122.

FERREIRA, R. L. et al. Ecologia populacional de *Goniosoma* sp. (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae) em uma caverna ferruginosa do município de Ouro Preto, MG. **Revista Brasileira de Zoociências**, v. 7, n. 2, p. 203–216, dez. 2005.

GATRELL, A. C. et al. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. **Royal Geographical Society**, v. 21, p. 256–274, 1996.

GNASPINI, P. Population ecology of *Goniosoma spelaeum*, a cavernicolous harvestman from south-eastern Brazil (Arachnida: Opiliones: Gonyleptidae). **Journal of Zoology**, v. 239, p. 417–435, 1996.

GREEN, J. L. et al. Complexity in ecology and conservation: Mathematical, statistical, and computational challenges. **Bioscience**, v. 55, n. 6, p. 501–510, jun. 2005.

HOLMBERG, R. G.; ANGERILLI, N. P. D.; LACASSE, J. L. Overwintering aggregation of *Leiobunum paessleri* in caves and mines (Arachnida, Opiliones). **The Journal of Arachnology**, v. 12, p. 195–204, 1984.

HOWARTH, F. G. Ecology of cave arthropods. **Annual Review of Entomology**, v. 28, p. 365–389, jan. 1983.

JANZEN, D. H. Complexity is in the eye of the beholder. In: ALMEDA, F.; PRINGLE, C. M. (Ed.). **Tropical rainforests: Diversity and conservation**. São Francisco: California Academy of Science and AAAS, 1988. p. 29–51

MACHADO, S. F.; FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Aspects of the population ecology of *Goniosoma* sp. (Arachnida Opiliones Gonyleptidae) in limestone caves in southeastern Brazil. **Tropical Zoology**, v. 16, p. 13–31, 2003.

MYERS, N. Ecological complexity. In: MYERS, N. **The primary source: Tropical forests and our future**. New York: Norton, 1992. p. 68–90.

PERRY, J. N. et al. Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. **Ecography**, v. 25, p. 578–600, 2002.

PINTO-DA-ROCHA, R. Invertebrados cavernícolas da porção meridional da Província Espeleológica do Vale do Ribeira, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 10, p. 229–255, 1993.

POULSON, T. L.; WHITE, W. B. The cave environment. **Science**, v. 165, n. 3897, p. 971–981, set. 1969.

SCHAFFER, W. M. Ecological abstraction: the consequences of reduced dimensionality in ecological models. **Ecological Monographs**, v. 51, n. 4, p. 383–401, 1981.

SIMÕES, M. H. **Invertebrados cavernícolas: subsídios para a determinação de cavernas e áreas prioritárias para conservação no noroeste de Minas Gerais**. 2013. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SIMON, K. S.; BENFIELD, E. F.; MACKO, S. A. Food web structure and the role of epilithic films in cave streams. **Ecology**, v. 9, n. 84, p. 2395–2406, 2003.

SIMON, K. S.; PIPAN, T.; CULVER, D. C. A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 69, n. 2, p. 279–284, 2007.

SOUZA, M. F. V. R. **Diversidade de invertebrados subterrâneos da região de Cordisburgo, Minas Gerais: subsídios para a determinação de cavernas prioritárias para conservação e para o manejo biológico de cavidade turísticas**. 2012. 149 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

SOUZA-SILVA, M. **Ecologia e conservação das comunidades de invertebrados cavernícolas na mata atlântica brasileira**. 2008. 224 p. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SOUZA-SILVA, M. et al. Importação e processamento de detritos orgânicos em uma caverna calcária. **EspeleoTema**, v. 19, p. 31–41, 2007.

SOUZA-SILVA, M. et al. Transport and consumption of organic detritus in a neotropical limestone cave. **Acta Carsologica**, v. 41, n. 1, p. 139–150, 2012.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Trophic dynamics in a neotropical limestone cave. **Subterranean Biology**, v. 9, p. 127–138, 2011.

TRAJANO, E.; GNASPINI-NETTO, P. Notes on the food webs in caves of southeastern Brazil. **Mémoires de Biospéologie**, v. 18, p. 75–79, 1991.

WALLER, L. A.; GOTWAY, C. A. **Applied spatial statistics for public health data**. New Jersey: J. Wiley, 2004. 641 p. (Series in probability and statistics).

WILLEMART, R. H.; GNASPINI, P. Spatial distribution, mobility, gregariousness, and defensive behaviour in a brazilian cave harvestman *Goniosoma albiscriptum* (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae). **Animal Biology**, v. 54, n. 3, p. 221–235, 2004.

ZAMPAULO, R. A. **Diversidade de invertebrados cavernícolas na província espeleológica de Arcos, Pains e Doresópolis (MG):** subsídios para a determinação de áreas prioritárias para conservação. 2010. 207 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM BASEADA EM AGENTES DE UMA REDE TRÓFICA DE SISTEMA CAVERNÍCOLA FERRUGINOSO

RESUMO

Na modelagem computacional baseada em agentes, procura-se identificar as principais características individuais e inseri-las em um modelo computacional para avaliar a sua influência no fenômeno modelado. Neste trabalho, apresenta-se um modelo computacional baseado em agentes para o estudo de uma rede trófica cavernícola de sistema ferruginoso. A escolha do modelo foi em decorrência da importância das características individuais de cada um dos animais componentes da fauna estudada. Uma das características modeladas é a interação ecológica predador-presa, que é comumente estudada do ponto de vista da energia envolvida no sistema. Para isso, no modelo proposto, foi realizado um estudo voltado para analisar a influência de três níveis de energia, uma associada ao desenvolvimento do indivíduo, outra ao processo de reprodução e uma terceira voltada ao controle de predação. Para simplificar a modelagem, considerou-se o sistema composto somente por fêmeas, ou seja, todos os indivíduos podem gerar descendentes. Cada indivíduo ainda pode executar uma caminhada aleatória bidimensional no interior da área da caverna modelada. As configurações como número de ovos por fêmea, tempo de vida, tamanho do passo, dentre outras, foram baseadas na literatura e também no conhecimento de especialistas. Com a simulação do modelo desenvolvido, foi possível constatar o processo de difusão em decorrência da caminhada bidimensional, fazendo com que desta forma todos os lugares da caverna chegassem a conter algum indivíduo, sendo ele presa ou predador. Em decorrência do tamanho do passo foi possível identificar a formação de *clusters*, estes associados aos animais que apresentaram um pequeno deslocamento. Os primeiros resultados indicam que os níveis de energia associados ao crescimento, reprodução e predação são fatores decisivos no processo de evolução da população. Também foi possível observar características básicas de uma dinâmica populacional, como as oscilações predador-presa. Dessa maneira, o modelo proposto foi capaz de reproduzir qualitativamente os resultados observados no fenômeno estudado. Como trabalhos futuros, espera-se empregar o modelo para a realização de previsões com o objetivo de avaliar a efetividade da translocação de fauna como alternativa para a conservação de sistemas subterrâneos.

Palavras-chave: Modelo matemático e computacional. Simulação. Sistemas ecológicos. Níveis de energia.

ABSTRACT

In agent-based computational modeling, we seek to identify the main individual characteristics and insert them into a computer model to assess their influence on the modeled phenomenon. In this work, it was presented an agent-based computational model for the study of a cave food web of ferruginous system. The choice of this model was due to the importance of individual characteristics of each animal belonging to the fauna studied. One of the modeled features is the predator-prey ecological interaction, which is commonly studied from the viewpoint of energy involved in the system. For this, in the proposed model, a study to analyze the influence of three levels of energy was conducted, one of these associated with the individual development, another related to the reproduction process and the third focused on the predation control. To simplify the modeling, it was considered the system consisting of only females, that is, all individuals can generate offspring. Each individual can still perform a two-dimensional random walk inside the shaped cave area. Settings such as number of eggs per female, lifetime, step size, among others, were based on the literature and also on the knowledge of experts. With the simulation of the developed model, it was possible to determine the diffusion process due to the two-dimensional walk, making everywhere in the cave to contain some individual, being prey or predator. Due to the step size it was possible to identify cluster formation, these associated with animals that showed a small offset. The first results indicate that the energy levels associated with the growth, reproduction and predation are decisive factors in the process of population evolution. It was also possible to observe basic characteristics of a population dynamics, such as predator-prey oscillations. Thus, the proposed model was able to reproduce the results observed in the studied phenomenon qualitatively. With further studies, it is expected to employ the model to perform predictions to evaluate the effectiveness of wildlife translocation as an alternative for underground system conservation.

Keywords: Mathematical and computational model. Simulation. Ecological systems. Energy levels.

1 INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

A modelagem matemática e computacional apresenta-se como uma ferramenta simplificadora de sistemas ecológicos, que frequentemente, são caracterizados como sistemas altamente complexos. A sua utilização em estudos de redes tróficas, possibilita ao pesquisador investigar o sistema estudado e compreender melhor os mecanismos ecológicos envolvidos. Segundo Boccara (2004), se um simples modelo captura as características chave de um sistema complexo, ele pode permitir a descoberta de questões altamente relevantes. Green et al. (2005) destacam os dois principais desafios no estudo desses sistemas: o entendimento das forças que organizam sistemas heterogêneos no espaço e no tempo e também a partir dessa compreensão, direcionar os problemas ambientais tanto em escalas locais quanto globais.

Schmolke et al. (2010) ressaltam que o desenvolvimento de modelos ecológicos é um processo desafiador. Entretanto, os autores destacam a importância desses modelos para facilitar o entendimento de como os ecossistemas funcionam e como as atividades antrópicas interagem com esses sistemas, a fim de tornar as medidas de proteção ambiental mais eficientes.

A modelagem matemática permite estudar os mais diferentes problemas, independente de sua natureza. Atualmente, é uma área que ganha destaque nas pesquisas, pois permite reproduzir diferentes fenômenos, estabelecendo suas condições específicas. Tais condições podem ser associadas à características de interesse do estudo desenvolvido.

Um modelo matemático tem que reproduzir, principalmente de maneira qualitativa, o objeto modelado. Portanto, torna-se necessário estudar o problema detalhadamente para ser possível identificar características a serem reproduzidas.

Uma vez identificadas, essas devem ser representadas em um modelo matemático.

A implementação desse modelo pode ser realizada de diferentes maneiras. Uma das formas mais utilizadas são as equações diferenciais, nas quais a característica corresponde a uma equação diferencial, que quando analisada, permite entender o comportamento das equações e conseqüentemente associá-lo ao problema estudado (GIACOMINI, 2007). Como exemplo, pode-se citar o estudo de dinâmica populacional, utilizando os Modelos de Lotka-Volterra (MURRAY, 2002). Uma outra forma de implementação é por meio de modelos experimentais, nos quais o problema a ser estudado é reproduzido em menor escala e as conclusões associadas ao problema real. Uma das formas mais utilizadas de implementação é por meio de linguagem de programação. Nesse modelo, as características do fenômeno estudado são descritas por meio de regras computacionais. Essas são reproduzidas por um computador, independente do número de vezes, e os resultados obtidos podem ser associados ao problema estudado.

Dentre os modelos computacionais, destaca-se a Modelagem Baseada em Agentes ou Modelagem Baseada em Indivíduos. Nesse tipo de modelagem, as características individuais são importantes e influenciam na análise do comportamento da população, na qual estão inseridas. Esse modelo permite reproduzir o comportamento individual e também analisar características do comportamento de uma população. Um dos principais aspectos desse tipo de modelagem é que ela é capaz de integrar os diferentes níveis hierárquicos dos processos ecológicos, como por exemplo ecologia de indivíduos, populações, comunidades e ecossistemas (HUSTON; DEANGELIS; POST, 1988). Giacomini (2007) destaca a crescente utilização da modelagem baseada em indivíduo para a análise de processos ecológicos, desenvolvimento e avaliação de teorias e também no manejo da vida silvestre e conservação.

Dessa maneira, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de um Modelo Baseado em Agentes para o estudo de uma rede trófica, resultante da translocação de fauna cavernícola realizada por Ferreira, em 2004, envolvendo a construção de uma galeria artificial. Esse modelo foi escolhido, pois a sua característica primordial é a utilização do indivíduo como unidade básica (GIACOMINI, 2007). O sistema estudado é composto por indivíduos de espécies que estabelecem interações ecológicas entre si, com indivíduos de espécies diferentes e também com o meio, descrevendo o comportamento da fauna como um todo. Portanto, as características individuais são importantes para a descrição e estudo do fenômeno.

2 METODOLOGIA

2.1 Dados Analisados

Os dados analisados neste trabalho são resultado do experimento de translocação de fauna cavernícola realizado por Ferreira, em 2004. Nesse experimento foram registrados dados de abundância e distribuição espacial de 136 espécies, das quais 57 foram translocadas e 79 colonizaram ativamente a galeria. Desse total de espécies, foram selecionadas dez espécies, as que apresentaram maior persistência temporal nos monitoramentos trimestrais. As espécies selecionadas correspondem a Entomobryidae sp., Collembola sp., *Endecous sp.*, *Eidmanacris sp.*, Blattodea sp., Gonyleptidae sp., Pselaphinae sp1, *Goniosoma vatrax*, Theridiidae sp. e *Isoctenus sp.* Com base nas dez espécies selecionadas, é proposta a rede trófica apresentada na Figura 1.

Um fato pouco comum em sistemas cavernícolas foi observado nas cavernas naturais da região, na qual foi construída a galeria. A base trófica da maioria dessas cavernas é composta por raízes de plantas. Portanto, durante o experimento de translocação, mudas de espécies nativas da região foram transplantadas para a superfície da galeria. Apesar da importância desse recurso para as espécies da região, estes não foram considerados na rede trófica proposta, pois a maioria das plantas ressecaram e algumas morreram, embora nos últimos monitoramentos tenha sido observada a presença significativa de algumas raízes. Outros recursos que compõem a base trófica da comunidade são o guano (depósito de fezes do morcego nectarívoro *Glossophaga sp.*), fungos e matéria orgânica, composta por folhas e troncos. Esses recursos não foram quantificados durante a realização do experimento. Dessa maneira, a base trófica do sistema simulado foi representada pela Matéria Orgânica, englobando folhas, troncos e guano.

Na rede trófica proposta (Figura 1) os detritívoros generalistas são representados pelas espécies de Entomobryidae sp., Collembola sp., *Endecous sp.*, *Eidimanacris sp.* e Blattodea sp. Como espécies onívoras, são representadas as espécies Gonyleptidae sp., *Goniosoma vatrax* e Pselaphinae spl. Esta última corresponde a uma espécie troglóbia, isto é, restrita a habitats subterrâneos (HOLSINGER; CULVER, 1988), que colonizou ativamente a galeria artificial após a translocação. As espécies troglóbias apresentam elevada sensibilidade à mudanças bruscas no ambiente e distribuição restrita, além de elevado grau de endemismo (FERREIRA, 2011). Este pode ser um dos fatos que mostrem uma tendência ao sucesso da translocação realizada. Destaca-se também a presença de uma espécie troglóxena, o opilião *Goniosoma vatrax*, ou seja, que é encontrada em ambientes subterrâneos, porém saem regularmente para se alimentarem (HOLSINGER; CULVER, 1988). Os opiliões geralmente são animais que saem das cavernas durante a noite para se alimentarem de pequenos artrópodes, matéria orgânica em decomposição e detritos de plantas (CAPOCASALE; BRUNO-TREZZA, 1964; EDGAR, 1971; FERREIRA et al., 2005; PHILLIPSON, 1960). Ferreira et al. (2005) destacam a importância dessa espécie para comunidades cavernícolas, uma vez que elas se alimentam no meio epígeo e servem de presa para outros organismos no meio subterrâneo, contribuindo assim, com matéria e energia para o interior da caverna.

Na rede trófica proposta existem duas aranhas predadoras, Theridiidae sp. e *Isoctenus sp.* Theridiidae sp. é uma aranha que faz teia e apresenta estratégia de “senta e espera”. Após o seu nascimento, ela escolhe um local para fazer sua teia e só abandona este na ausência de alimento ou no caso dos machos, no período reprodutivo. Já *Isoctenus sp.* é uma aranha cursorial, que busca suas presas e não faz teia.

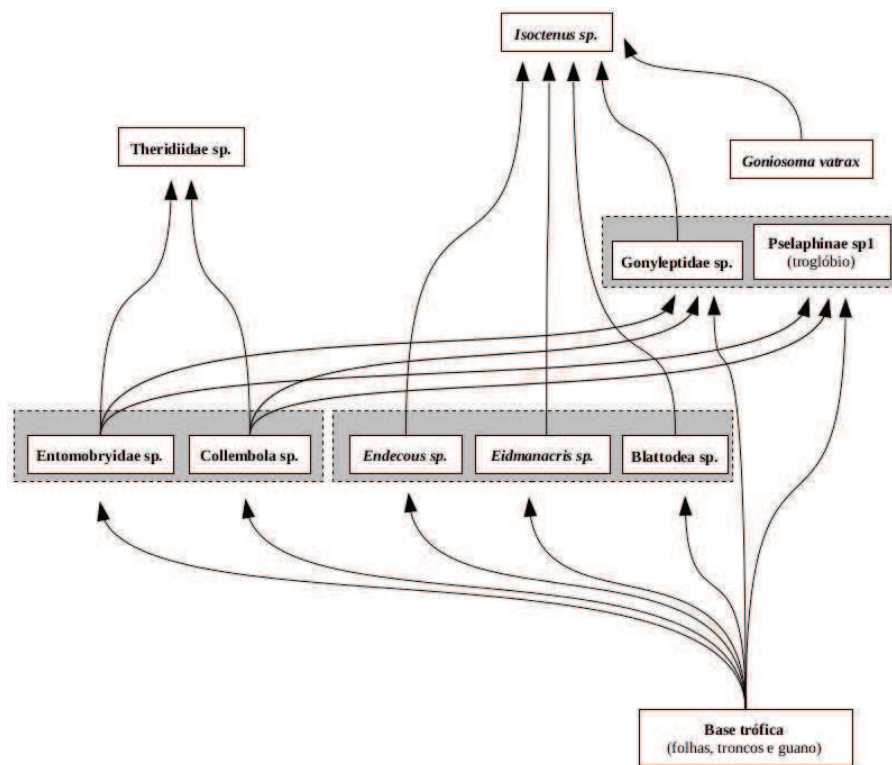


Figura 1 Modelo diagramático da rede trófica analisada. Os grupos de espécies que estabelecem relações competitivas mais intensas foram agrupados por meio de retângulos na coloração cinza

2.2 Modelo Baseado em Agentes

O Modelo Baseado em Agentes consiste em reproduzir o comportamento individual e coletivo para verificar a influência da dinâmica populacional na evolução de uma população. Para isso foram avaliadas 11 espécies, as 10 espécies selecionadas mais os detritos, que foram considerados como uma espécie, sendo que para cada uma delas consideraram-se as seguintes características:

- a) Comportamento: Presa ou predador;
- b) Número médio de ovos por ovoposição;
- c) Tempo médio de vida;
- d) Tamanho do passo;
- e) Raio de ataque;
- f) Idade mínima para reprodução;
- g) Energia;
- h) Tempo de simulação;
- i) Tamanho da população.

O parâmetro de configuração comportamento define se o indivíduo modelado irá se comportar como presa ou predador. É essencial considerar as relações de presa-predador na modelagem, pois estas são vitais para tentar entender o comportamento dos animais e prever o comportamento temporal e espacial dessas populações. Assim, na hora de se alimentar, deve-se avaliar as respectivas preferências alimentares que estão definidas na Tabela 1. Os animais que morrem por idade passam a integrar o nível de matéria orgânica e são consumidos pelo animais detritívoros.

Tabela 1 Relações predador-presa do sistema estudado

Espécies Predadoras	Presas			
Entomobryidae sp.	Matéria Orgânica			
Collembola sp.	Matéria Orgânica			
<i>Endecous sp.</i>	Matéria Orgânica			
<i>Eidmanacris sp.</i>	Matéria Orgânica			
Blattodea sp.	Matéria Orgânica			
Gonyleptidae sp.	Matéria Orgânica	Entomobryidae sp.	Collembola sp.	
Pselaphinae sp1	Matéria Orgânica	Entomobryidae sp.	Collembola sp.	
<i>Goniosoma vatrax</i>				
Theridiidae sp.	Entomobryidae sp.	Collembola sp.		
<i>Isoctenus sp.</i>	<i>Endecous sp.</i>	<i>Eidmanacris sp.</i>	<i>Goniosoma vatrax</i>	Blattodea sp. Gonyleptidae sp.

O número médio de ovos por postura é o parâmetro que irá determinar quantos ovos, em média, são ovipositados pelo indivíduo. No modelo são considerados que existem apenas fêmeas, ou seja, cada indivíduo pode gerar λ descendentes. Esse parâmetro ainda descreve a média gerada por indivíduo, pois para gerar o número de ovos foi utilizado um gerador de números aleatórios baseado na Distribuição Poisson (MOOD; GRAYBILL; BOES, 1974).

O tempo médio de vida, medido em dias, é outro parâmetro baseado na Distribuição de Probabilidade Poisson (MOOD; GRAYBILL; BOES, 1974), que determina o tempo médio de vida de cada indivíduo.

Já o tamanho do passo determina qual o tamanho máximo do passo que um indivíduo pode dar. Seus valores são definidos por um gerador de número aleatório baseado em uma Distribuição Uniforme (MOOD; GRAYBILL; BOES, 1974). Se o tamanho do passo for L , a faixa de valores utilizadas para o sorteio vai de $-L$ até L . Com isso, cada indivíduo descreve um passeio aleatório bidimensional pela caverna modelada.

O parâmetro raio de ataque determina qual a distância mínima entre predador - presa, para que o predador faça a captura de sua presa. Caso tenha mais de uma presa dentro de seu raio de ataque, esta é sorteada e o predador irá capturá-la, removendo-a da simulação. Na Figura 2, é representada uma aranha com presas ao seu redor, apenas as presas que encontram-se dentro do raio de ataque podem ser predadas.

A idade mínima de reprodução é um parâmetro que configura o tempo de simulação que cada indivíduo tem que esperar para poder iniciar a reprodução.

O parâmetro energia descreve qual o nível de energia que o animal fornece ao seu predador, ou seja, ele descreve quantos animais o predador, dependendo do tamanho da presa, deve consumir para se manter vivo. Também considera-se

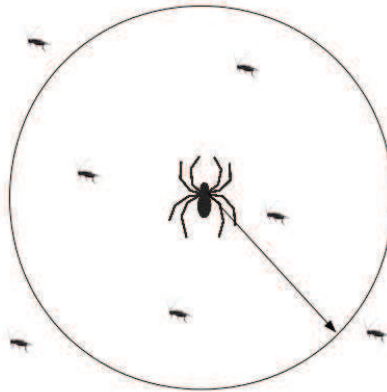


Figura 2 Representação esquemática do parâmetro raio de ataque

que caso o predador precise apenas de uma parte da energia da presa, esta, depois de capturada, torna-se detrito e serve de alimento para as outras espécies. Esse parâmetro é dividido em três, sendo eles:

1. Nível de energia para se desenvolver;
2. Nível de energia para se reproduzir;
3. Nível de energia para se alimentar.

O parâmetro nível de energia para se desenvolver consiste no nível de 0% até 100%, que representa a energia gasta a cada 12 horas de simulação. O indivíduo quando é inserido na simulação possui um nível de 100%. A cada 12 horas, perde uma quantidade determinada pelo nível de energia para se desenvolver. Quando o nível de energia do indivíduo cai abaixo do nível de energia para se alimentar, ele inicia o processo de caça de uma presa. Já o nível de energia para se reproduzir, consiste na quantidade de energia que o indivíduo gasta para gerar um descendente. Com esses parâmetros, espera-se estudar o comportamento do nível da energia da dinâmica populacional na caverna. Considera-se que este estudo

pode fornecer resultados, inicialmente qualitativos, que auxiliem em ajustes mais específicos do modelo.

O parâmetro tempo determina o tempo de simulação da dinâmica populacional. No modelo, é considerado um sistema de 12 horas, ou seja, a unidade de tempo corresponde a metade de um dia.

O parâmetro tamanho da população determina qual o número máximo de indivíduos que será simulado.

Um procedimento, que deve ser feito antes de criar os indivíduos e soltá-los dentro da caverna, é inserir alguns detritos para servirem de alimento para os animais detritívoros. Este procedimento é bem semelhante ao que foi empregado na construção da cavidade artificial, uma vez que os indivíduos detritívoros precisam de alimento para se desenvolver e servir de fonte de energia para os predadores.

A dinâmica de funcionamento do modelo está descrita na Figura 3. Em 1 – Criar, todos os animais são posicionados no mapa de acordo com um arquivo de configuração que indica qual animal é posicionado e em que posição. Uma vez posicionados, a simulação é iniciada e a dinâmica populacional ocorre.

Em 2 – Movimentar, cada um dos animais executam um passeio aleatório bidimensional. A cada 12 horas, o animal dá um passo, que corresponde ao deslocamento médio dentro da caverna. Os animais que não se movimentam, recebem como parâmetro tamanho do passo o valor 0. Quando eles geram descendentes, um ponto próximo à origem dos pais é repassada ao descendente.

Na fase 3 – Crescer, o contador da idade do animal é atualizado. Caso ele chegue a sua idade máxima, ele é transformado em detrito e disponibilizado como alimento para os outros animais. Se este animal ainda não atingiu a idade máxima, esta é atualizada em uma unidade e ele volta para a simulação para interagir com os outros animais modelados. Ainda nesta fase, o seu nível de energia decai a um

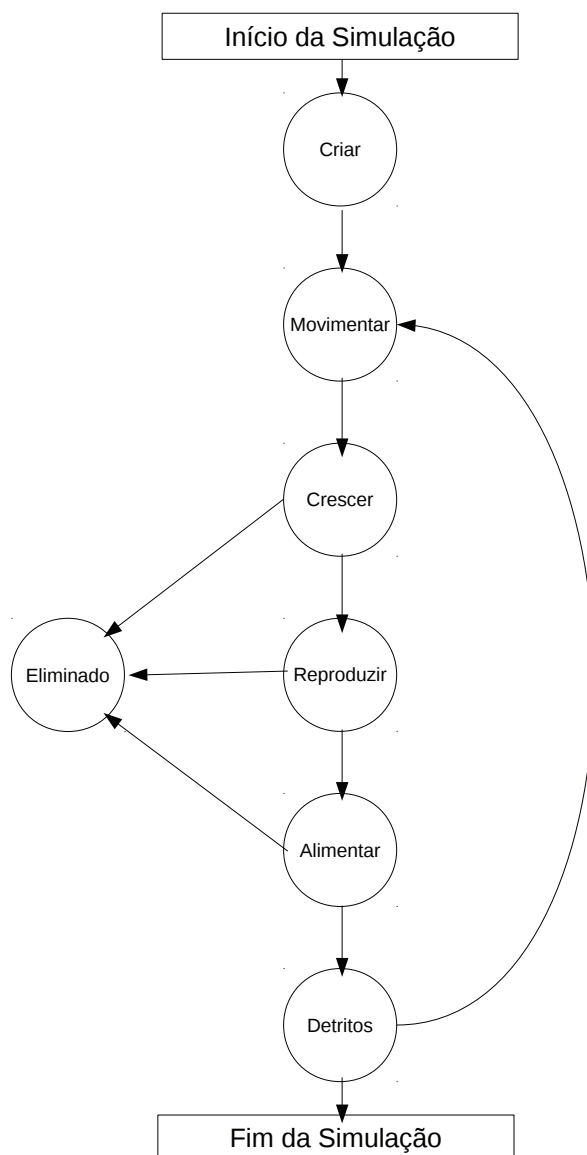


Figura 3 Grafo representando a dinâmica de funcionamento do modelo

valor correspondente ao nível de energia para crescer.

Na fase 4 – Reproduzir, cada um dos animais, quando chega a sua fase adulta, que é definida como parâmetro do modelo denominado Idade Mínima de Reprodução, começa a gerar descendentes. O número médio de descendentes é determinado pelo número médio de ovos por postura. Considera-se que uma vez gerado o indivíduo já está apto a se movimentar na caverna, porém deverá esperar o tempo necessário para se reproduzir. Esta corresponde a uma simplificação considerada no modelo. O processo de reprodução ocorre uma vez por ano, ou seja, quando na simulação o contador de tempo assume valores múltiplos de 730, os animais aptos se reproduzem. Ainda nessa fase, para cada indivíduo que for gerado, o progenitor tem o seu nível de energia reduzido em um valor igual ao nível de energia para reproduzir, parâmetro do modelo.

Fase 5 – Alimentar, nessa fase, cada um dos animais é selecionado para se alimentar. O processo consiste em determinar quais animais estão dentro do seu raio de ataque. Uma vez selecionado, escolhe-se aleatoriamente um animal e este é removido da simulação. Para ser selecionado o seu nível de energia tem que estar abaixo do nível de energia para se alimentar, caso esteja, o animal se alimenta de acordo com a sua preferência alimentar, definida pela Tabela 1. Ao capturar uma presa, o predador absorve o nível de energia da mesma, podendo chegar ao máximo de 100%. Caso o valor ultrapasse, o predador não precisa de toda a energia da presa e esta é transformada em detrito. Caso o predador utilize toda a energia, a presa é removida da simulação.

Fase 6 – Detritos, nessa fase são inseridos detritos de forma aleatória na caverna para representar o processo de degradação da matéria orgânica não somente da caverna, mas de possíveis alimentos que podem ter sido inseridos por processos naturais. Os detritos são inseridos quando existe espaço para criar mais

indivíduos, uma vez que o detrito foi considerado como um indivíduo a ser simulado. Caso exista espaço, a cada 12 horas é inserido 5% do tamanho da população como detrito. Ao finalizar essa fase, retorna-se a Fase 2 e o processo é reiniciado.

Na simulação foram consideradas algumas configuração especiais. Para a espécie *Goniosoma vatrax*, quando o tempo representa um período noturno, esta é removida da simulação, retornando nos períodos que representam o dia, pois trata-se de uma espécie troglóxena (FERREIRA et al., 2005).

O modelo foi desenvolvido na linguagem Fortran.

Para utilizar um modelo computacional, que utiliza um modelo matemático para representar um fenômeno da natureza, torna-se necessário fazer algumas considerações, principalmente a respeito da forma como os elementos foram modelados. Uma das considerações está relacionada à caverna. O desenho original da cavidade artificial está representado na Figura 4. Como processo de modelagem da caverna, foi retirada apenas a sua informação essencial, que está relacionada ao seu formato. O desenho utilizado para representar a galeria nas simulações está representado na Figura 5. Nessa Figura, verificam-se as coordenadas dos limites utilizados para definir a área, na qual os indivíduos modelados podem se locomover. No modelo, o indivíduo executa uma caminhada aleatória bidimensional dando passos de tamanho estipulado no intervalo $[-L;L]$. Como exemplo, representa-se o deslocamento de um indivíduo na Figura 6, sendo que o tamanho do passo a ser dado faria com que ele entrasse nas paredes da caverna. Para controlar esse problema, se o indivíduo, dando o passo sorteado, chegasse a sair da caverna por 1 cm, este seria inserido novamente no interior da caverna em uma posição de 1 cm da parede, como ilustrado na Figura 6.

Os parâmetros utilizados para realizar as simulações foram retirados da literatura e estão representados na Tabela 2. Alguns foram definidos por especia-



Figura 4 Desenho original da cavidade artificial

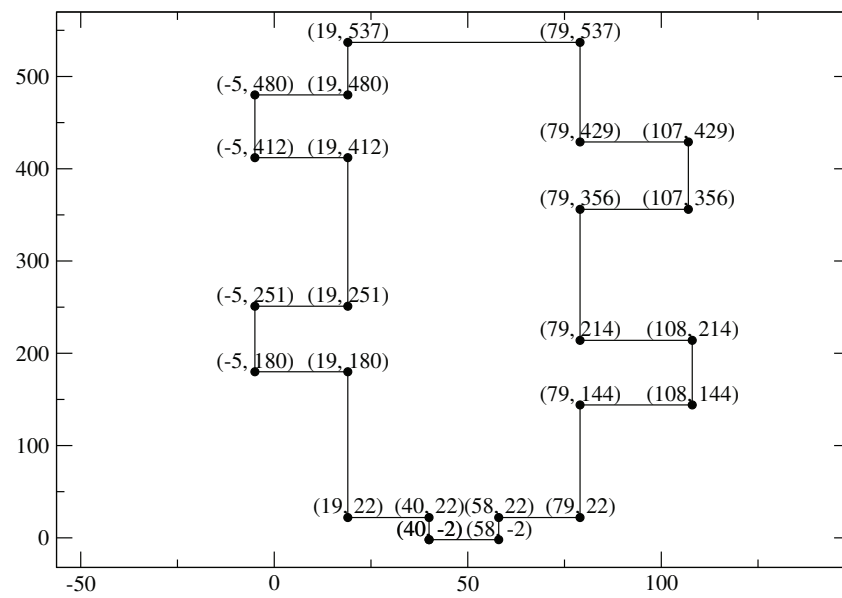


Figura 5 Estrutura da caverna utilizada para executar a simulação. Em destaque as coordenadas dos pontos utilizados como limites da área modelada, na qual os indivíduos podem se deslocar

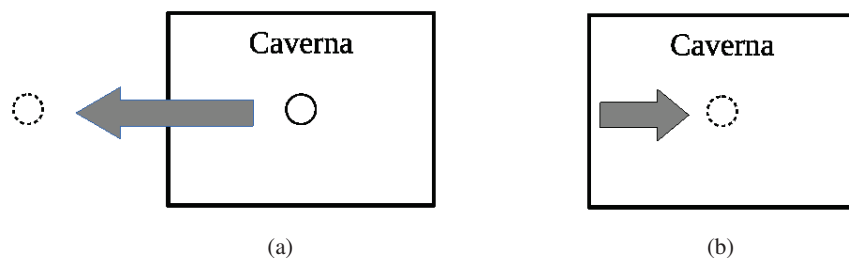


Figura 6 Ilustração da condição de contorno utilizada. Se um indivíduo tenta se locomover para fora da caverna, executando uma caminhada aleatória (a), a distância entre a posição futura (linha tracejada) e a caverna será utilizada para reposicionar o indivíduo dentro da mesma (b)

listas. Esses parâmetros são carregados no início da simulação e utilizados pelo método Criar, para definir as características dos indivíduos que foram criados para a simulação.

Tabela 2 Descrição dos valores utilizados nas simulações. A coluna Espécie determina a espécie que consta nas simulações. A coluna Tipo determina o comportamento do indivíduo modelado, sendo 0 presa e 1 predador. O Número de Ovos determina, em média, quantos ovos o indivíduo pode ovipor durante a sua vida, ou seja, a quantidade de descendentes que ele pode gerar. O Tempo de Vida, determina, dentro da escala de tempo do modelo – 12 horas, o tempo que o indivíduo irá viver em média. Um indivíduo com 600 unidades de tempo, vive em média 10 meses. A coluna Tamanho do Passo determina o tamanho do passo que pode ser dado pelo indivíduo, sendo o intervalo determinado por [-L,L], por exemplo o indivíduo da espécie *Endecous sp.* pode dar passos dentro do intervalo [-10,10]. Raio de Ataque é a distância entre o predador e a presa, no qual o predador pode capturar o seu alimento. A Idade Mínima de Reprodução é o tempo mínimo que um indivíduo tem que esperar para poder se reproduzir

Espécie	Tipo	Número de Ovos	Tempo de Vida	Tamanho do Passo	Raio de Ataque	Idade Mínima para Reprodução
Entomobryidae sp.	0	80	270	0,5	0,1	120
Collembola sp.	0	80	270	0,5	0,1	120
<i>Endecous sp.</i>	0	20	600	10,0	0,1	120
<i>Eidmanacris sp.</i>	0	35	730	10,0	0,1	120
Blattodea sp.	0	20	2190	1,0	0,1	120
Gonyleptidae sp.	1	30	730	5,0	0,3	120
Pselaphinae sp1	1	25	3650	0,5	0,2	120
<i>Goniosoma vatrax</i>	1	100	1460	5,0	0,1	120
Theridiidae sp.	1	25	730	0,5	0,1	120
<i>Isoctenus sp.</i>	1	50	2920	5,0	1,0	120
Matéria Orgânica	0	0	120	0,0	0,0	0

Para criar os indivíduos que serão modelados, definir o tempo de simulação e o número de componentes utiliza-se um arquivo denominado espécie. Nesse arquivo, estão colocados de forma estruturada os dados referentes aos primeiros animais que vão iniciar a simulação. Uma parte da estrutura do arquivo espécie pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 Estrutura do arquivo que define o tempo de simulação (10.000), o número de indivíduos que serão simulados (20.000) e o número de indivíduos que vão iniciar a simulação (121). Define-se também o nível de energia para crescer (0,1), gasto a cada 12 horas, o nível de energia necessário para reproduzir (10) e o nível de energia que permite ao indivíduo procurar alimento (50). Na sequência, cada um dos 121 indivíduos que vão iniciar a simulação são inseridos na caverna, nas coordenadas indicadas, por exemplo, na linha 1 65 258, um indivíduo da espécie 1 é inserido na coordenada (65, 258) no plano xy que contém a caverna. As características desse indivíduo são definidas segundo o arquivo de configuração descrito na Tabela 2

10.000
20.000
121
0,1
10
50
1 65 258
1 67 186

Da forma como foi implementado, basta alterar o arquivo espécie que uma nova simulação pode ser gerada. A estrutura de arquivos de configurações foi definida desta forma, para permitir que as simulações possam ser realizadas em paralelo e sem a necessidade de compilação do arquivo executável a cada simulação. Um outro motivo será apresentado na proposta de trabalhos futuros discutida no final deste capítulo.

3 RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos com algumas simulações, visando representar a dinâmica populacional no interior da caverna.

3.1 Processo de Caminhada Bidimensional

Nessa subseção, foi analisado o comportamento da caminhada bidimensional para uma determinada espécie. A simulação foi realizada com todas as espécies do sistema e para exemplificar são apresentados os resultados para a espécie *Endecous sp.* A simulação foi realizada durante 6.000 unidades de tempo do modelo. A sequência do processo de difusão dos indivíduos pela caverna pode ser verificada na Figura 7. Nessa Figura, pode-se observar pontos vermelhos, que representam cada indivíduo modelado. No tempo de 12 unidades de simulação, tem-se 17 indivíduos (Figura 7(a)). No decorrer da simulação, além de executar a caminhada, mais indivíduos são inseridos no sistema, devido ao processo de reprodução. Na sequência, nos tempos 1.200, 2.004, 4.008, 5.004 e 6.000, pode-se verificar a difusão dos indivíduos pela cavidade. A caverna só não foi completamente ocupada, pois os indivíduos precisam de mais tempo de simulação, devido a estrutura da cavidade, que possui entradas que dificultam o deslocamento. Mesmo assim, pode-se verificar que o modelo consegue reproduzir o processo difusivo da população, nesse caso da espécie *Endecous sp.*

A próxima simulação se refere ao comportamento do processo de difusão da espécie *Theridiidae sp.* Como está descrito no arquivo de configurações, a caminhada bidimensional é realizada com um passo no intervalo $[0,5;0,5]$, ou seja, 20 vezes menor do que o da espécie *Endecous sp.* Na Figura 8, verifica-se o resultado dessa simulação nos tempos 12, 1.200, 2.004, 4.008, 5.004 e 6.000.

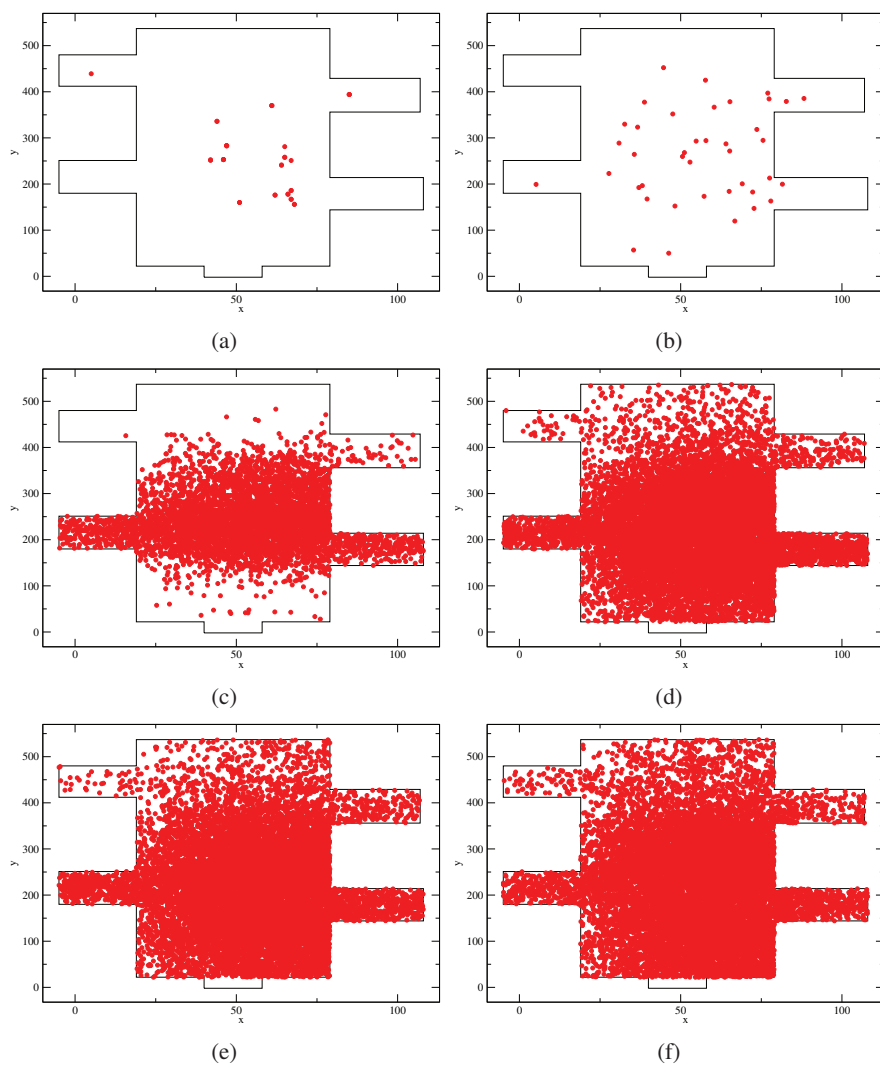


Figura 7 Processo de caminhada aleatória bidimensional da espécie *Endecous sp.* nos tempos de simulação 12 (a), 1.200 (b), 2.004 (c), 4.008 (d), 5.004 (e) e 6.000 (f)

Diferente do resultado obtido no caso da espécie *Endecous sp.*, Theridiidae sp. tende a manter-se em uma unidade e a formar um conglomerado. Como o número de descendentes é maior e o tamanho do passo bem menor, a tendência é que os indivíduos fiquem concentrados, como observado na sequência de imagens da Figura 8. Novamente, pode-se verificar que o modelo consegue reproduzir o comportamento para os indivíduos com passos pequenos.

3.2 Simulação da Dinâmica Populacional

Um dos aspectos importantes a serem considerados na análise de translocação de fauna, nesse caso em cavernas, é a dinâmica populacional dos animais translocados. Esse entendimento fornece informações sobre como os animais se comportam, gerando assim, conhecimentos que auxiliem na avaliação da efetividade da translocação de fauna cavernícola, uma vez que se trata de uma abordagem nova para a conservação de sistemas subterrâneos.

Para tentar reproduzir esse comportamento, foi utilizado o modelo baseado em agentes. Para determinar o número inicial de indivíduos de cada espécie, considerou-se o número de presas e predadores na proporção de 10:1, ou seja, para cada 10 presas é adicionado 1 predador. Como tempo de simulação utilizou-se 20.000 horas, que correspondem a 1667 unidades de horas do modelo (12 horas), aproximadamente 2 anos e 3 meses. O tamanho máximo da população foi de 20.000 indivíduos, sendo que iniciaram a simulação 275. Desses 275 indivíduos, tem-se as presas em quantidades de 50 e os predadores em quantidades de 5, contabilizando 250 presas e 25 predadores.

Ao iniciar a simulação, considerou-se a existência de detritos depositados na caverna. No modelo, cada detrito é representado como um indivíduo e possui uma idade para permanecer na simulação e a medida que é consumido e perde

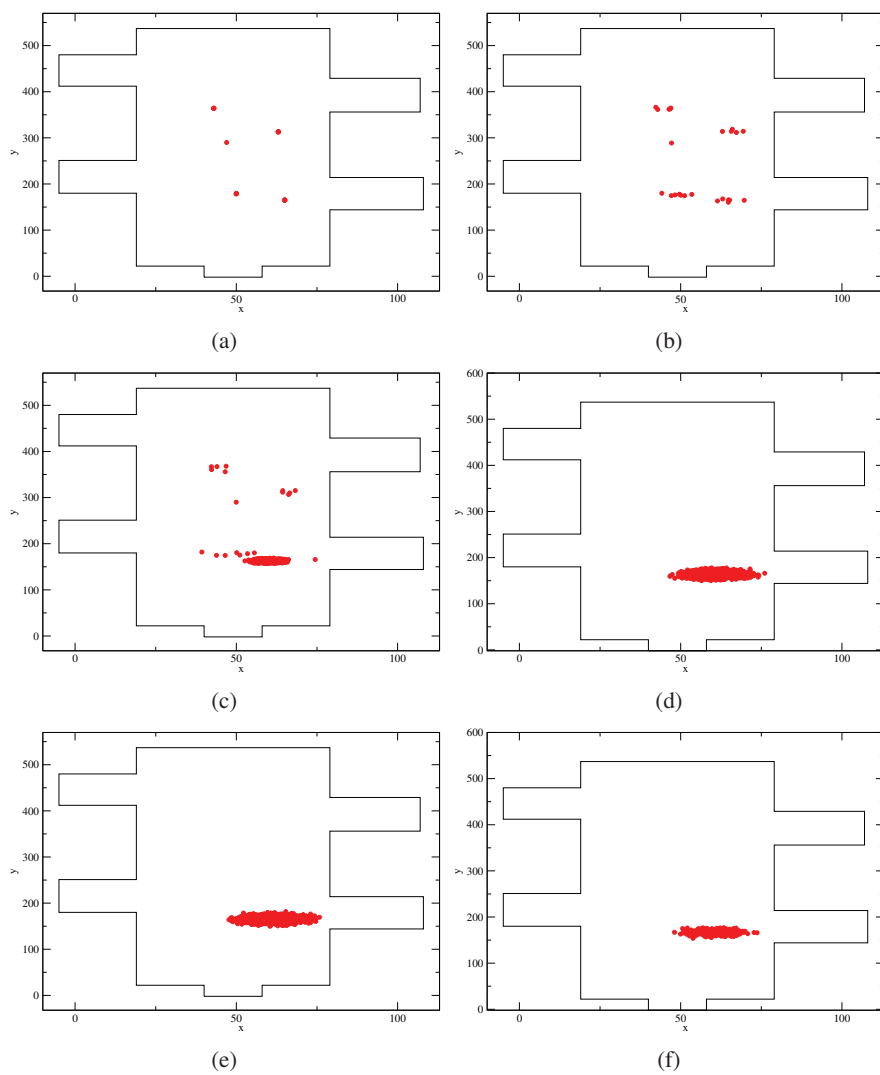


Figura 8 Processo de caminhada aleatória bidimensional da espécie *Theridiidae* sp. nos tempos de simulação 12 (a), 1.200 (b), 2.004 (c), 4.008 (d), 5.004 (e) e 6.000 (f)

energia, pode desaparecer. Nessa simulação, no início, são introduzidos 10% do número total de indivíduos, ou seja, 2.000 pontos de detritos, dentro da caverna de forma uniforme. A cada 12 horas, também é adicionado 0,1% do espaço para atingir a capacidade de suporte total da caverna na forma de detritos. Se a capacidade de suporte for atingida e não existir mais espaço, não são mais inseridos detritos no sistema, ficando dependentes apenas da mortalidade dos animais modelados.

Uma vez definidos os parâmetros gerais, deve-se determinar os níveis de energia a serem utilizados. Nesse caso foram utilizados três valores para cada nível. Para o nível de energia para o crescimento (ec) e reprodução (er) consideraram-se os valores de 1%, 10% e 50%. O valor 1% indica que apenas 1% da energia máxima do indivíduo deve ser removida a cada 12 horas para simular o crescimento e na geração de um indivíduo na sua prole. Caso o processo reprodutivo gere 10 indivíduos, a progenitora irá perder 10% da sua energia. O valor de 50% é um caso extremo, pois o indivíduo fica condicionado a gerar no máximo 2 indivíduos, sendo removido logo em seguida da simulação por não ter energia para se manter. Os níveis de energia que determinam se um indivíduo vai ou não preda (ef) foram definidos, assumindo os seguintes valores 30%, 50% e 80%, ou seja, quando a energia do indivíduo estiver abaixo desses três níveis, ele inicia a sua predação, sendo que as presas predam os detritos.

Os primeiros resultados estão relacionados aos valores de níveis de energia para crescimento ($ec = 0,01$), reprodução ($er = 0,01$) e predação ($ef = 0,80$). Esses resultados podem ser visualizados na Figura 9. Nessa Figura, pode-se identificar que a população de *Endecous sp.* explode inicialmente. Esse fato pode ser justificado pela presença de grande quantidade de detritos, o que viabiliza o seu crescimento. Fato também observado para as espécies *Eidmanacris sp.* e *Isoctenus sp.* Como a simulação inicia com aproximadamente 2 mil detritos, estes logo são

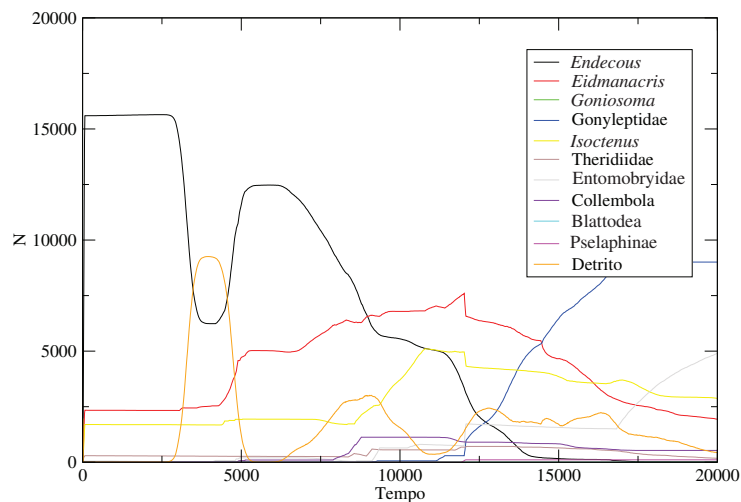


Figura 9 Simulação para $er = 0,01$, $ec = 0,01$ e $ef = 0,80$

consumidos pelas espécies detritívoras, que por sua vez, fornecem energia para a espécie predadora. Com a morte dos indivíduos de *Endecous sp.*, a população de detritos cresce, mas depois volta a decrescer. Por volta do tempo de 10 mil horas, a população de *Gonyleptidae sp.* cresce, seguida pelas demais. As oscilações nas curvas estão relacionadas ao nascimento, morte e predação dos indivíduos. Com as regras impostas, de forma qualitativa, pode-se verificar que o modelo consegue reproduzir uma dinâmica populacional. Ressalta-se que essa dinâmica depende muito das configurações iniciais, como exemplo, a necessidade de apenas 1% da energia para se desenvolver e para reproduzir. Outro fato importante é o nível de energia que determina a procura por alimento, nesse caso de 80%. Com 20 unidades de tempo (12 horas) ou da geração de 20 indivíduos em uma prole, o indivíduo já inicia a predação, o que provoca as oscilações nas curvas.

O modelo ainda permite avaliar a distribuição espacial dos indivíduos modelados. Essa avaliação expressa a caminhada bidimensional de cada um dentro da caverna e está representada na Figuras 10, 11 e 12. Pode-se verificar que inicial-

mente existiam poucos espécimes, mas com o avanço da dinâmica populacional, em decorrência do processo de reprodução e predação, as populações sofreram flutuações. Essas flutuações podem ser constatadas pelo número de pontos nos gráficos, que correspondem aos indivíduos modelados. A formação de *clusters* se deve ao fato dos animais, pertencentes a estes *clusters*, possuírem tamanho de passo pequeno para executar a caminhada aleatória bidimensional.

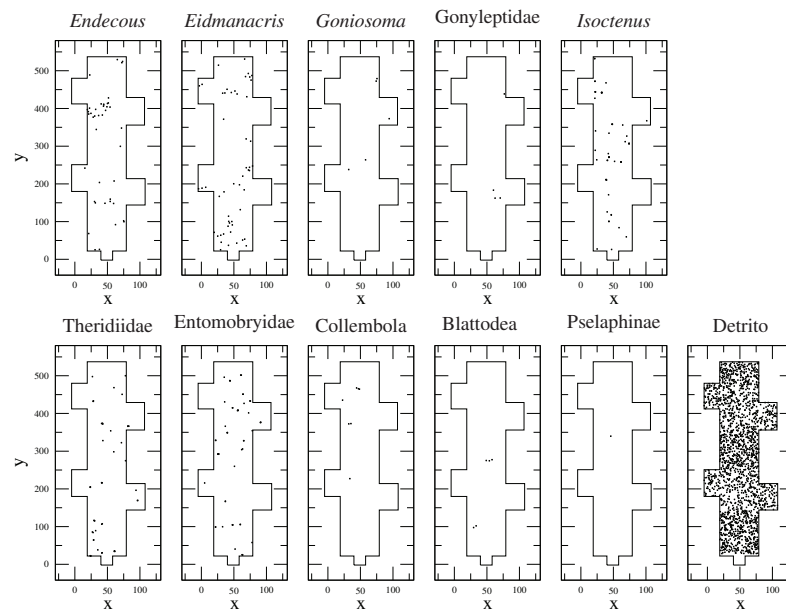


Figura 10 Deslocamento dos indivíduos durante a simulação no tempo de 12 horas de simulação

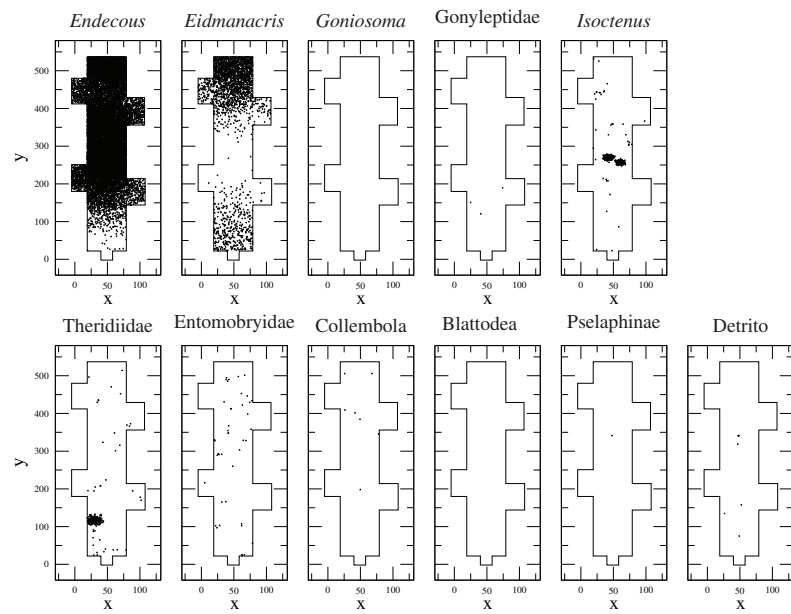


Figura 11 Deslocamento dos indivíduos durante a simulação no tempo de 1,2 mil horas de simulação

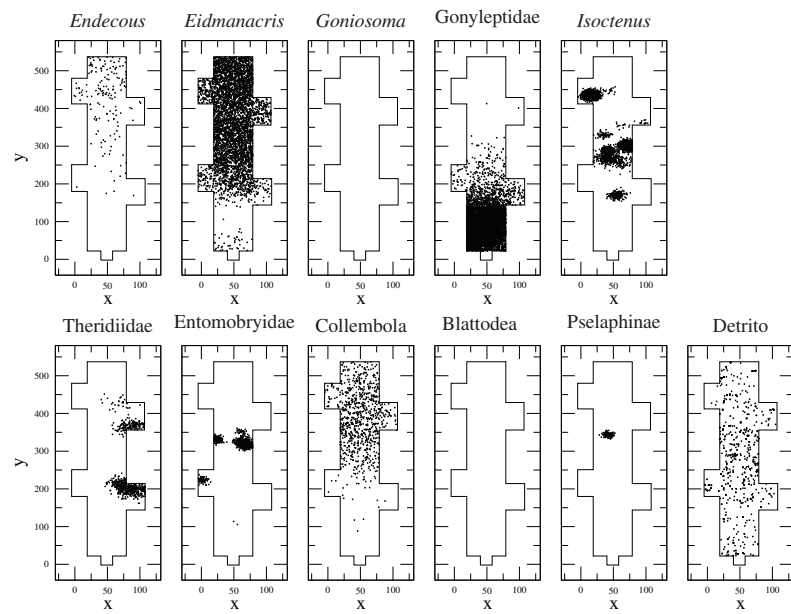


Figura 12 Deslocamento dos indivíduos durante a simulação no tempo de 15 mil horas de simulação

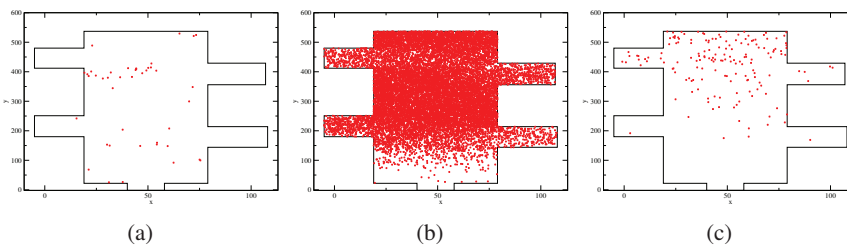


Figura 13 Deslocamento espacial da espécie *Endecous sp.* nos tempos de 12 horas (a), 1,2 mil horas (b) e 15 mil horas de simulação (c)

Pode-se verificar que há um aumento de determinadas populações, analisando os pontos presentes que foram manchas. Verifica-se que com o aumento da população e demanda por alimento, as populações de presas e detritos reduzem bastante, porém a dinâmica persiste. Como exemplo, na Figura 13, está representada a dinâmica populacional da espécie *Endecous sp.*, nos tempos de 12 horas, 1,2 mil horas e 15 mil horas de simulação.

Pode-se verificar uma explosão da população, em decorrência do gasto energético baixo e da disponibilidade de alimento. O número reduzido de predadores também auxiliou nesse crescimento. Porém quando há uma redução na quantidade de alimento e um aumento no número de predadores, ocorre a redução da população. Novamente, esses resultados, do ponto de vista qualitativo, permitem observar a dinâmica populacional da fauna cavernícola modelada.

O parâmetro nível de energia para predação era usado com um valor igual a 80%, ou seja, somente quando o nível de energia do indivíduo cai abaixo de 80% que ele inicia o processo de predação. As próximas simulações correspondem a uma redução nesse nível, ou seja, a um retardo no início do processo para verificar a influência desse parâmetro na dinâmica populacional modelada. Na Figura 14, pode-se verificar a dinâmica com as mesmas configurações anteriores, porém com valor de $ef = 0,50$ e $ef = 0,30$. Verifica-se uma mudança nas oscilações das cur-

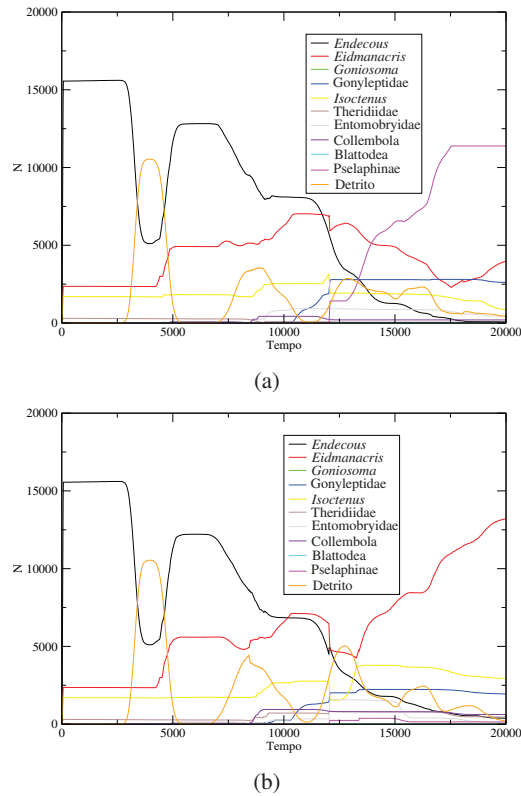


Figura 14 Dinâmica populacional para as espécies modeladas com as mesmas configurações, diferenciando apenas o nível de energia para predação: $ef = 0,50$ (a) e $ef = 0,30$ (b)

vas das espécies, crescendo ou decaindo, em decorrência do processo de retardado da predação. Para algumas espécies esse retardo é benéfico, para outras nem tanto. O benefício pode ser atribuído ao retardo da predação, mas o decaimento ocorreu em decorrência do maior gasto energético, ou seja, se o indivíduo não encontra recursos ou gera indivíduos com uma energia baixa, ele aumenta a probabilidade de ser eliminado da simulação. Esses fatos podem justificar, em alguns casos, o decréscimo observado nas populações de algumas espécies.

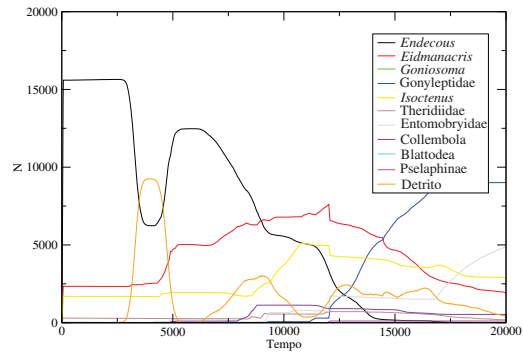
Para constatar o decréscimo em função do gasto energético para reprodu-

ção, manteve-se o nível de energia de crescimento em 1% e o nível de predação em 80%, alterando o nível de energia para reprodução, ou seja, aumentando a demanda de energia para gerar descendentes. Com isso, espera-se verificar que o aumento no gasto energético para reprodução faz com que haja uma redução na população.

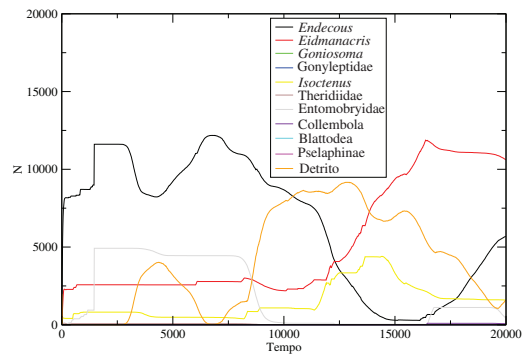
Na Figura 15, estão representados os resultados para três níveis de energia de reprodução. Observe que com o aumento na demanda de energia para gerar descendentes, houve uma queda no tamanho das populações, influenciando diretamente a dinâmica e em alguns casos, constata-se a erradicação de algumas populações. Esse fato permite concluir que a espécie para se manter ativa no sistema, deve antes de tudo otimizar o uso energético a fim de manter um número mínimo de indivíduos para a propagação da população. Esses resultados são influenciados apenas pela reprodução, uma vez que o gasto energético do crescimento está constante e em nível baixo.

O nível de energia para o crescimento, ou seja, a quantidade de energia necessária para o indivíduo passar 12 horas na simulação também é importante para a dinâmica populacional. Para verificar essa importância, o nível de energia para reprodução foi reduzido para 1%, mantendo o nível de predação em 80% e utilizando três valores para o nível de crescimento, 1%, 10% e 50% para cada 12 horas de simulação. Na Figura 16, pode-se constatar a importância do gasto energético no desenvolvimento de uma espécie. O aumento do gasto energético, para o indivíduo passar 12 horas de simulação, influencia diretamente a dinâmica populacional, podendo acarretar na erradicação da espécie. Como forma de contornar este problema, a espécie deve ter mecanismos de otimização do gasto energético, a fim de promover a persistência temporal da espécie.

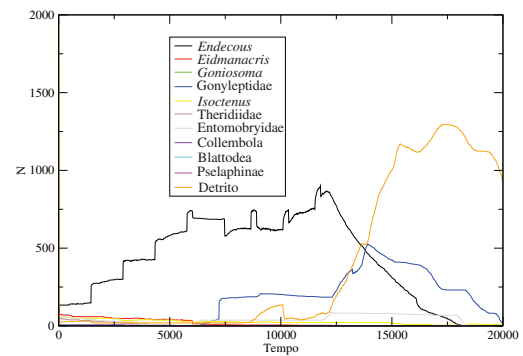
Os resultados apresentados levam à conclusão de que o gasto energético é



(a)



(b)



(c)

Figura 15 Análise da influência da energia para a reprodução na dinâmica populacional. Nessas simulações foram utilizados $er = 0,01$ (a), $er = 0,10$ (b) e $er = 0,50$ (c)

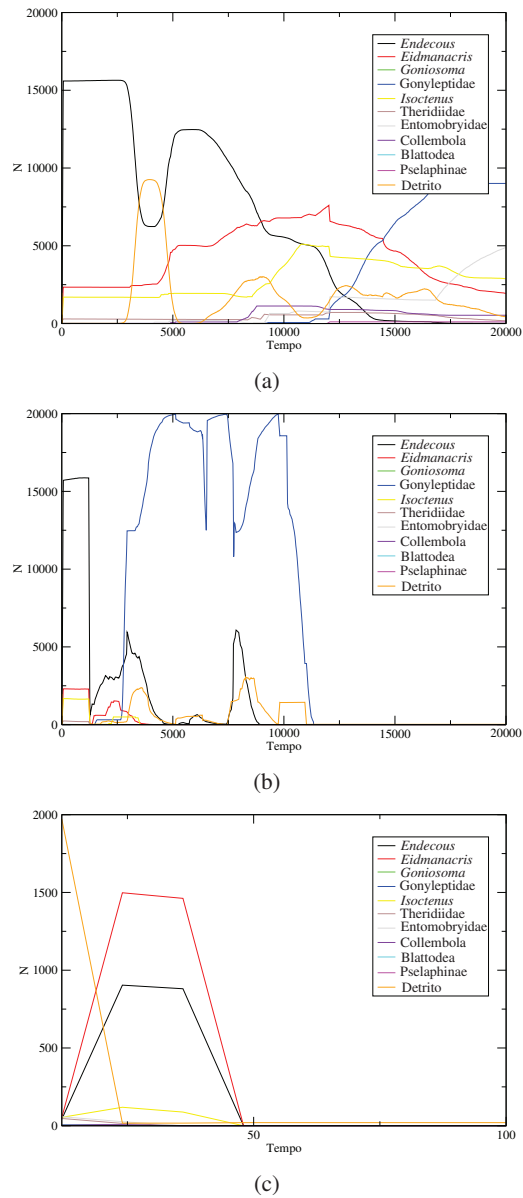


Figura 16 Influência do nível de energia de crescimento na dinâmica populacional. Verifica-se que o aumento da demanda de energia para o indivíduo permanecer na simulação a cada 12 horas é crucial para a sua sobrevivência, podendo levar a erradicação de sua espécie. Nessas simulações foram utilizados $ec = 0,01$ (a), $ec = 0,10$ (b) e $ec = 0,50$ (c)

fundamental para a dinâmica populacional. A espécie deve gastar pouca energia para se manter ativa e reproduzir, apresentando mecanismos de otimização desse gasto. Essa otimização faz com que a população consiga, pelo menos do ponto de vista computacional, manter a dinâmica populacional.

4 TRABALHOS FUTUROS

Como apresentado nesse estudo, os níveis de energia tem elevada importância na dinâmica populacional. Como foram testados apenas alguns valores, espera-se realizar um estudo mais amplo, considerando tais parâmetros como variáveis aleatórias e por meio de uma abordagem de Inferência *Bayesiana*, estimar a distribuição de cada um deles a partir dos dados coletados por Ferreira, em 2004. Ainda pelo processo *bayesiano* espera-se confirmar as informações utilizadas para a modelagem, uma vez que a execução do experimento forneceu um banco de dados que possui informações a serem exploradas.

Uma outra abordagem que ainda será realizada é o estudo, por meio de Grafos Aleatórios Exponenciais, das relações entre os indivíduos da caverna a fim de entender a complexa relação entre os animais da fauna cavernícola. Apesar de ser um sistema, que em partes pode ser avaliado como presa-predador, apresenta um nível de complexidade elevado. A dificuldade em modelar esse sistema é devido principalmente aos poucos estudos realizados sobre esse tipo de fauna e consequentemente a ausência de informações sobre a biologia e ecologia desses animais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo proposto no trabalho conseguiu reproduzir qualitativamente os resultados observados no fenômeno estudado, destacando a importância do fluxo de energia no sistema para a dinâmica computacional.

Em trabalhos futuros, será desenvolvida a etapa de validação do modelo. Nesse etapa, os dados oriundos dos monitoramentos da galeria artificial serão incorporados ao modelo para analisar a sua efetividade em descrever os cenários observados. A partir do momento que o modelo apresentar um bom ajuste, serão realizadas previsões temporais para o fenômeno estudado. Essa configura uma etapa de grande importância no estudo da efetividade do experimento de translocação de fauna cavernícola para a cavidade artificial, principalmente em termos conservacionistas. O experimento realizado por Ferreira não teve a intenção de propor a utilização de programas de translocação de fauna como uma alternativa de manejo conservacionista empregada nos casos de destruição de cavidades subterrâneas. Porém, previsões temporais e espaciais feitas com base no estudo realizado e tendo como base o modelo proposto, tornará possível a investigação do estado do sistema daqui a cinco, dez, vinte anos, por exemplo. Assim, torna-se possível saber se as populações translocadas realmente realizaram todas as fases de uma translocação que obteve sucesso, ou seja, se a população, após a soltura, foi capaz de sobreviver no novo ambiente, se estabelecer na área e reproduzir com sucesso (GOSLING; SUTHERLAND, 2000; FESTA-BIANCHET; APOLLONIO, 2003; LETTY et al., 2003). Se daqui a vinte anos, por exemplo, as previsões do modelo indicarem a presença de uma quantidade razoável de indivíduos de uma determinada espécie, tal fato indica que esta obteve sucesso no novo ambiente. Assim, espera-se que este trabalho seja uma base para futuras pesquisas que

contribuam para o desenvolvimento de alternativas de conservação ou técnicas de manejo que ajudem a conservar os sistemas cavernícolas, que são altamente ameaçados. Espera-se que as pesquisas auxiliem não apenas a conservação de sistemas cavernícolas, mas também de outros sistemas naturais em ameaça.

É importante destacar que a primeira alternativa de conservação de uma caverna ameaçada de destruição é a sua conservação, principalmente se ela é relevante para a biodiversidade da região. Porém, se esta torna-se inviável, é necessário que biólogos e pesquisadores ambientais pensem em alternativas que garantam a sobrevivência do sistema que será destruído e a sua perpetuação. Muitas atividades antrópicas, atualmente, ameaçam sistemas naturais e se a sua manutenção como sistema original é impossível, é preciso pensar em alternativas. Acredita-se que seja ainda prematuro afirmar que a translocação signifique uma dessas alternativas, porém com o desenvolvimento de estudos futuros que incorporem a multidisciplinaridade, espera-se que seja possível fazer uma afirmativa se esta configura-se como uma alternativa de conservação eficiente para sistemas subterrâneos ferruginosos.

O desenvolvimento de pesquisas que apresentem em sua abrangência a integração da Biologia, Física, Matemática, Estatística e Ciências da Computação é fundamental para a evolução da conservação. Cada área de forma individual possui técnicas e conhecimentos específicos, que quando somados representam possibilidades de estudos mais abrangentes, com conclusões mais efetivas e diretas. As pesquisas tornam-se mais completas e a possibilidade destas auxiliarem no desenvolvimento da ciência é ainda maior. Portanto, é necessário que as diversas linguagens da ciência se comuniquem para que seja possível a existência de um diálogo e uma convivência harmoniosa entre o homem e a natureza.

REFERÊNCIAS

- BOCCARA, N. **Modeling complex systems**. Springer, 2004. 397 p.
- CAPOCASALE, R.; BRUNO-TREZZA, L. Biologia de *Acanthopachylus aculeatus* (Kirby, 1819) (Opiliones; Pachylinae). **Revista de la Sociedad Uruguaya de Entomología**, v. 6, p. 19–32, 1964.
- EDGAR, A. L. Studies on the biology and ecology of Michigan Phalangida (Opiliones). **Miscellaneous Publications**, Museum of Zoology, University of Michigan, v. 144, p. 5–64, 1971.
- FERREIRA, C. F. Análise de impactos ambientais em terrenos cársticos e cavernas. In: **CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECV/Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade, 2011. p. 123–148.
- FERREIRA, R. L. et al. Ecologia populacional de *Goniosoma* sp. (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae) em uma caverna ferruginosa do município de Ouro Preto, MG. **Revista Brasileira de Zoociências**, v. 7, n. 2, p. 203–216, dez. 2005.
- FESTA-BIANCHET, M.; APOLLONIO, M. **Animal behavior and wildlife conservation**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.
- GIACOMINI, H. C. Sete motivações teóricas para o uso da modelagem baseada no indivíduo em ecologia. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 3, p. 431–446, 2007.
- GOSLING, L. M.; SUTHERLAND, W. J. **Behaviour and conservation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- GREEN, J. L et al. Complexity in ecology and conservation: Mathematical, statistical, and computational challenges. **Bioscience**, v. 55, n. 6, p. 501–510, jun. 2005.
- HOLSINGER, R.; CULVER, D. C. **The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of eastern Tennessee: Zoogeography and ecology**. North Carolina: State Museum of Natural Sciences, 1988. 164 p.
- HUSTON, M.; DEANGELIS, D.; POST, W. New computer models unify ecological theory. **BioScience**, v. 38, n. 10, p. 682–691, nov. 1988.
- LETTY, J. et al. Effect of translocation on survival in wild rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). **Mammalian Biology**, v. 68, p. 250–255, 2003.

MOOD, A. M.; GRAYBILL, F. A.; BOES, D. C. **Introduction to the theory of statistics**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1974. 564 p.

MURRAY, J. D. **Mathematical biology**. Springer, 2002. 551 p.

PHILLIPSON, J. A contribution to the feeding biology of *Mitopus morio* (E) (Phalangida). **Journal of Animal Ecology**, v. 29, p. 35–43, 1960.

SCHMOLKE, A. et al. Ecological models supporting environmental decision making: a strategy for the future. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 25, p. 479–486, 2010.