

# Abordagem populacional na ecotoxicologia

Maurea Nicoletti Flynn

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, mestrado e doutorado em Oceanografia Biológica pela Universidade de São Paulo e pós-doutorado em ecologia aplicada e experimental pelo programa recém doutor do CNPq, Universidade de São Paulo. Foi coordenador do Curso de Engenharia Ambiental das Faculdades Oswaldo Cruz e Coordenadora de Pesquisas na Escola Superior de Química das Faculdades Oswaldo Cruz. Professor adjunto do curso de graduação em Ciências Biológicas e de pós-graduação em Biodiversidade da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Tem experiência nas áreas de Ecologia Bêntica, Ecologia Experimental, Dinâmica Populacional e Biodiversidade da Ambientes Aquáticos. Especialista em auditoria ambiental (Certificado EARA - Environmental Auditors Registration Association). E-mail: [maureaflynn@gmail.com](mailto:maureaflynn@gmail.com)

William Roberto Luiz Pereira

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Especialista em Biomatemática. Tem interesse na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia Teórica, Dinâmica Populacional e índices biológicos, tendo preferência aos seguintes temas: Alometria, Modelos Matemáticos Aplicados a Ecologia, Ecotoxicologia. Consultor do Instituto Inteligência para Sustentabilidade – I2S. E-mail: [william\\_roberto\\_luiz@hotmail.com](mailto:william_roberto_luiz@hotmail.com)

## Resumo

O intuito nesse artigo é demonstrar a possibilidade de realização de diagnósticos ambientais a partir de conceitos estritamente ecológicos pelo monitoramento de alguma população natural como indicadora de alteração no ambiente. Taxas intrínsecas da população monitorada podem ser usadas como um sinalizador de alterações no ambiente em que esta está inserida. Para isso contemplou-se o histórico da abordagem populacional na ecologia revendo-se os conceitos de crescimento exponencial, auto-limitação populacional e sistema consumidor-recurso. Foram analisados dados provenientes de populações reais procurando detectar padrões populacionais em sistema ecológico. Conclui-se que é possível

sim fazer diagnósticos ambientais a partir de conceitos estritamente ecológicos. Nunca se terá acesso total aos sistemas, pois é impossível modelar todo o ecossistema de interesse, mas é possível apresentar modelos que apresentem informações suficientes para facilitar a tomada de decisão frente a impactos que acarretem em desequilíbrio ambiental. Desequilíbrio este que possa influenciar uma ou várias populações, a rede trófica, a comunidade ou o ecossistema como um todo.

**Palavras-chaves:** Abordagem Populacional. Ecotoxicologia. Modelagem. Taxas Vitais Populacionais.

### **Abstract**

The aim of this paper is to demonstrate the possibility of environmental assessment based on strict ecological concepts through the monitoring of a natural population as indicator of environmental impact. Population intrinsic taxes can be used as a beeper of alterations in the environment where it is inserted. An historical overview of the population approach in Ecology and Ecotoxicology was contemplated reviewing the concepts of exponential growth, population auto-limitation and consumer-resource systems. Data from natural populations were analyzed in order to detect patterns in ecological system. In conclusion, it seems to be possible environmental assessments based on strict ecological concepts, although the impracticability of having total access to complexes ecological systems. Nevertheless models can be inferred presenting enough information to aid the process of decision concerning environmental impacts that cause instability which can influence one or more populations, the food net, the community or the whole ecosystem.

**Keywords:** Population Approach. Ecotoxicology. Modeling. Population Vital Taxes.

### **Apresentação**

---

FLYNN, Maurea Nicoletti; PEREIRA, William Roberto Luiz. Abordagem Populacional na Ecotoxicologia. *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 4, n. 3, p. 79-91, out. 2011.

O termo ecotoxicologia foi sugerido e definido pela primeira vez em 1969 pelo toxicologista francês Rene Truhaut para nomear a ciência que “estuda os efeitos das substancias naturais ou sintéticas sobre os organismos vivos, populações e comunidades, animais ou vegetais, terrestres ou aquáticas, que constituem a biosfera”. Surgiu como um ramo da toxicologia trazendo suas características metodológicas (foco em padronização, testes laboratoriais com espécie padrão e metodologias de avaliação de risco), o que não permitiu a incorporação da teoria ecológica. Entretanto, a atual necessidade de prever os principais efeitos de agentes tóxicos em populações naturais e sistemas ecológicos tem propiciado o aparecimento de um grande número de modelos preditivos. Estes modelos têm incrementado o conjunto de modelos convencionalmente usados nas derivações mais reducionistas da ecotoxicologia que consideram efeitos tóxicos a níveis moleculares, bioquímicos, celulares, teciduais e em organismos.

Muitos fenômenos ecológicos são contingenciados pelos organismos envolvidos e seus ambientes e muitos experimentos ecológicos só são válidos para o período, lugar e condições em que ocorrerem. Entretanto, a contingencia e a não reprodutibilidade experimental não são fato em todos os campos da ecologia. Existem, na ecologia populacional, muitos princípios que podem ser consideradas gerais, com padrões e regras replicáveis. Baseada nestes, a ecotoxicologia populacional cobre um vasto numero de tópicos voltados principalmente para temas como: a epidemiologia de doenças relacionadas a agentes químicos; os efeitos em determinadas qualidades populacionais gerais tais como taxas demográficas e persistência; e a genética populacional.

Como colocado por Turchin (2001) três princípios da dinâmica populacional se assemelham às leis gerais da física: o crescimento exponencial (simulado pela equação de Malthus), a auto-limitação populacional (modelo do crescimento logístico de Verhust-Pearl), e a oscilação consumidor-recurso (tendo como modelo clássico o sistema presa-predador de Lotka-Volterra). A incorporação de tais “leis” ou “regras” ampliam a interpretação toxicológica sobre os sistemas naturais. E

com este objetivo esse artigo analisará o histórico e a aplicação de princípios populacionais largamente aceitos na tentativa de prever o comportamento de populações naturais expostas a agentes estressores.

### **Histórico: Crescimento exponencial, auto-limitação populacional e sistema consumidor-recurso**

A fonte mais antiga da moderna ecologia populacional é teórico-analítica e derivada da demografia inglesa do século XVII, desenvolvida como tentativa de conhecer e controlar as epidemias, particularmente a peste bubônica. Foi possível então concluir que a população londrina dobrava a cada 64 anos, com base em estatísticas primárias de nascimentos, mortes e número de casamentos, e que esta duplicação da população acarretaria implicitamente uma deterioração da qualidade de vida, a não ser que os recursos e facilidades disponíveis também acompanhassem o crescimento populacional. Esta visão pessimista foi explorada por Malthus (1798), que notou que as populações tendem a crescer exponencialmente, enquanto seus recursos crescem em progressão aritmética (Figura 1a). O que leva à conclusão natural de que o crescimento populacional tende a ser controlado pela fome e pela miséria. A equação e solução propostas por Malthus para descrever tal comportamento são apresentadas a seguir.

$$\frac{dN}{dt} = rN = (b - d)N \quad N(t) = N(0)e^{rt} = N(0)e^{(b-d)t}$$

A forma diferencial da equação indica que a taxa de crescimento da população  $N$  em função do tempo  $(dN/dt)$  é igual à taxa de crescimento populacional  $(r)$  multiplicada pelo contingente populacional  $N$ . A taxa de crescimento populacional se traduz num balanço entre a taxa de indivíduos que nascem ( $b$  da palavra inglesa *birth*) e a taxa de indivíduos que morrem ( $d$  da palavra inglesa *death*) e regula o crescimento da população.  $N(0)$  é o tamanho da população no início do processo. Uma condição ecológica essencial é  $N(0) = 2$ , ou

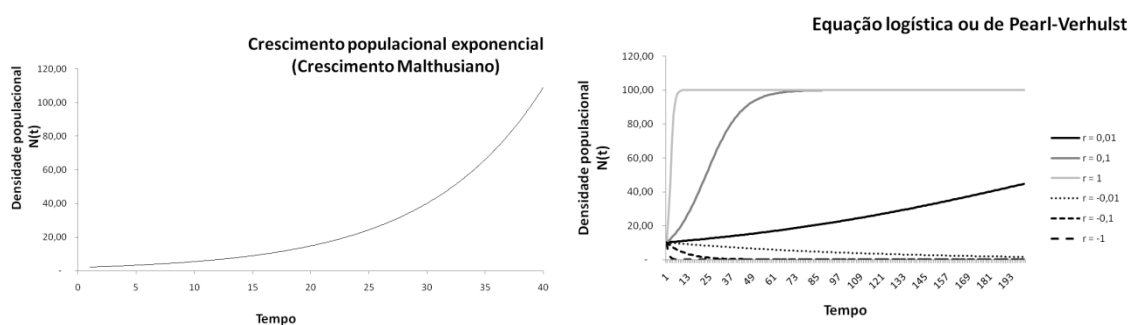
seja, o mínimo de 1 casal reprodutor (salvo em espécies, como as bactérias, com FLYNN, Maurea Nicoletti; PEREIRA, William Roberto Luiz. Abordagem Populacional na Ecotoxicologia. *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 4, n. 3, p. 79-91, out. 2011.

outras formas de reprodução). Apesar de o modelo ser aceito pelos ecólogos, ele raramente representa o comportamento temporal de populações reais.

No século seguinte, as concepções demográficas encontraram plena manifestação na modelagem matemática. O mais famoso destes modelos, a curva logística do crescimento populacional, foi proposto pelo belga Verhulst (1845) que lançou a hipótese de que o crescimento das populações humanas seria mais bem representado pela curva logística. Esta curva foi redescoberta por Pearl (1925), que a aplicou ao crescimento de diversas populações animais. Este modelo representou uma melhoria ao de Malthus pela inserção da razão  $\frac{(K-N)}{K}$ , termo que regula a taxa de crescimento ( $r$ ), aproximando-a de situações reais (Figura 1b):

$$\frac{dN}{dt} = r \left( \frac{K-N}{K} \right) N = r \left( 1 - \frac{N}{K} \right) N \quad N(t) = \frac{N(0)e^{rt}}{1 + \frac{N(0)(e^{rt}-1)}{K}}$$

De acordo com esta curva sigmóide, as populações atingiriam um patamar de equilíbrio, que corresponderia à capacidade de auto-sustentação do meio. Haveria, portanto, uma população sobrevivente e persistente de tamanho máximo permitida pelo ambiente, sendo o tamanho expresso pelo valor  $K$ . Essa interpretação, muito lógica e coerente, permitiu que um novo conceito fosse incorporado a ecologia, o conceito de **capacidade suporte**.

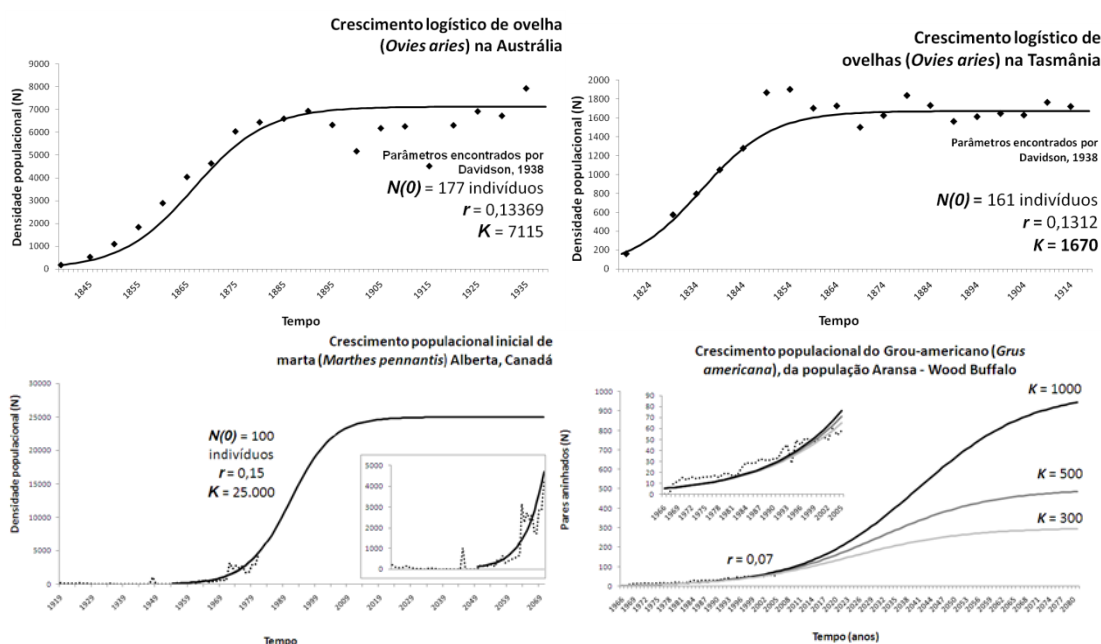


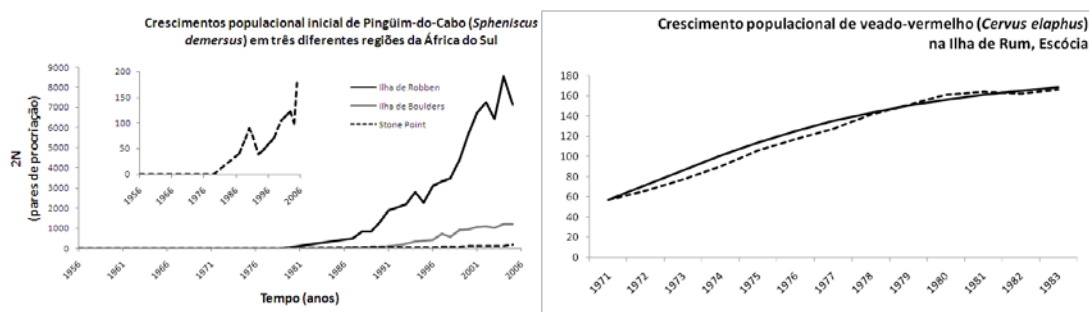
**Figura 1.** a) Plotagem da solução da equação de Malthus ( $r = 0,1, N(0) = 2$ ). Plotagem da solução da equação de Verhulst ( $N(0) = 10, K = 100$ ).

Na curva sigmóide, diferentemente da curva exponencial, há um momento em que a taxa relativa de crescimento populacional começa a ser freada (matematicamente isso ocorre quando  $dN/dt = rN(K-N)/K = 0$ ). A população neste ponto começa a sentir os efeitos das restrições ao crescimento impostas pelo

ambiente. O efeito máximo dessas restrições ocorre quando a população chega, finalmente, a capacidade suporte, ou seja, a valores em torno de  $K$ . Neste momento o contingente populacional não aumenta nem diminui à medida que o tempo passa, ficando sempre próximo ao valor condicionado por  $K$ . Ecologicamente dizemos que a população está em equilíbrio, e nesse caso, em **equilíbrio estável** (teoricamente e na natureza podem ocorrer também equilíbrio instável, ciclo-limite e caos. Esses conceitos foram descritos por May, 1976).

Pode-se refletir que as diversas espécies que conhecemos ao persistirem em seus habitats passaram por diversas catástrofes naturais (e ainda lutam contra as interferências humanas), e que processos evolutivos ocorreram para que se mantivessem em equilíbrio. Tal condição existe na natureza? A resposta é sim, existe, o que pode ser constatado pelas curvas adaptadas a dados documentados na literatura (Figura 2 a. 2b. 2c e 2d).





**Figura 2.** *a* e *b*) Crescimento logístico de ovelhas (*Ovis aries*) introduzidas na Austrália e na Tasmânia. Os parâmetros usados para plotar a curva sigmoidal e os dados podem ser encontrados em Davidson (1938 a,b) mesmo com as populações localizadas em regiões geográficas bem distintas. *c*) Flutuação temporal de marta (*Martes pennantis*) (Novak et al., 1987). A curva sigmóide inserida no gráfico se ajustou muito bem aos dados a partir do instante em que a população cresceu e revelando um início de crescimento exponencial. *d*) Ajuste da curva sigmóide para dados de populações monitoradas de grou-americano (*Grus americana*), a partir de  $r$  encontrado na literatura (Canadian Wildlife Service and U.S. Fish and Wildlife Service, 2005). *A priori*, não é possível saber para quais valores de  $K$  a população irá estabilizar. *e*) Crescimento populacional inicial de pingüim-do-Cabo (*Spheniscus demersus*) em três regiões distintas da África do Sul (Ilha de Robben, Ilha de Boulders e Stone Point) (Underhill et al., 2006). *f*) Crescimento populacional de veado-vermelho (*Cervus elaphus*) (Clutton-Brock et al., 1987). Os pontos amostrados estão pontilhados. A curva ajustada foi originada da equação equação- $\theta$  de Ricker na sua forma discretizada, com  $N_0 = 44$ ,  $r = 0,40$ ,  $K = 200$ ,  $\theta = 1,7$ . A curva ajustada “no olho” revelou a taxa intrínseca de aumento populacional, a capacidade-suporte e o expoente de competição intra-específica, os parâmetros populacionais necessários para explicar o comportamento da série temporal.

As espécies não se encontram isoladas no ambiente, apesar de algumas populações reais apresentarem crescimento ajustado à curva sigmóide (Figura 2). Dentre os dados populacionais analisados consideraram-se as espécies: *Ovis aries* espécie exótica introduzida na Austrália, *Marthes pennanti* cuja população sofre declínios devido à caça, *Grus americana* inserida em programa de recuperação, *Spheniscus demersus* cujas populações foram monitoradas em várias regiões e ilhas de África do sul, sendo que em 2 ilhas e um ambiente continental apresentaram indício de crescimento exponencial, e *Cervus elaphus* exterminada durante o século 18, e uma fonte de estudos para ecologia comportamental e socioecologia.

Porém, em regra, espécies interagem umas com as outras (tecnicamente, pertencem à mesma rede trófica), estão inseridas numa comunidade biológica e esta, num ecossistema. Existem várias formas de interação entre indivíduos de diferentes populações, sendo usuais as relações de competição e predação. Nosso bom senso nos diz que os leões não esgotam a população de suas presas, pelo

contrário, selecionam presas mais frágeis e/ou mais velhas; tubarões não esgotam o estoque de seus peixes preferidos, pelo contrário, suas presas são abundantes (provavelmente pelo fato das presas possuírem um  $r$  alto e os tubarões serem predador generalista). Mesmo o lince, um predador especialista, não esgota a sua presa favorita, a lebre-do-Ártico. Como a natureza resolve esse problema?

Para que ocorra predação é estritamente necessário que haja o encontro entre a presa e o predador. Se há uma grande quantidade de presas e uma pequena quantidade de predadores, a chance de captura é muito alta. E se há uma grande quantidade de predadores, rapidamente estes esgotariam suas presas e não resistiriam por muito tempo. Porém o predador possui uma capacidade natural para capturar suas presas (não serão considerados aspectos evolutivos, mas todas as populações adquirem certas habilidades que são otimizadas através de mecanismos evolutivos), supõe-se ainda que essa capacidade possa ser medida por um coeficiente, o coeficiente de ataque. Ao se inserir uma quantidade de predadores  $P$  e multiplicar-se esta pelo coeficiente de ataque, aqui denominado de  $a$ , ou seja,  $aP$ , pode-se avaliar a eficiência da população do predador de controlar a população da presa. E ao multiplica-se  $aP$  por  $V$ , pode-se avaliar o quanto a população de presa será afetada. Como  $aPV$  interfere negativamente sobre a população de  $V$ ,  $\frac{dV}{dt}$  temos  $\frac{dV}{dt} = rV - aPV$ .

Lotka imaginou que a população de predadores crescerá de forma diferente da exponencial apesar desta também apresentar em tese a capacidade de crescimento exponencial natural prevista por Fenchel (1974). O predador depende muito da oferta de presas para alimentar suas crias e, por isso, o seu crescimento populacional depende do quanto cada presa consumida é convertida em energia. Pode-se imaginar outro coeficiente, o coeficiente de eficiência de conversão ( $b$ ), que mede o quanto de energia a presa fornece para o sustento de um único indivíduo predador. Obviamente para que isto aconteça é necessário o encontro entre a presa e o predador. Análogo a modelagem da presa, se obtém  $bPV$ , e, portanto,  $\frac{dP}{dt}$ . A população de presa sofre uma interferência negativa

determinada pela mortalidade natural de indivíduos da própria população. Ao multiplicar a taxa de mortalidade ( $d$ ) a população de presas,  $P$ , obtém-se  $dP$ . Este termo age negativamente sobre a população de predadores. Então se  $\frac{dP}{dt} = bPV - dP$ , obtém o sistema resultante abaixo. Não se tratará aqui da solução do sistema, mas esta é uma função que tem comportamento elipsóide.

$$\frac{dV}{dt} = rV - aPV \text{ e } \frac{dP}{dt} = bPV - dP$$

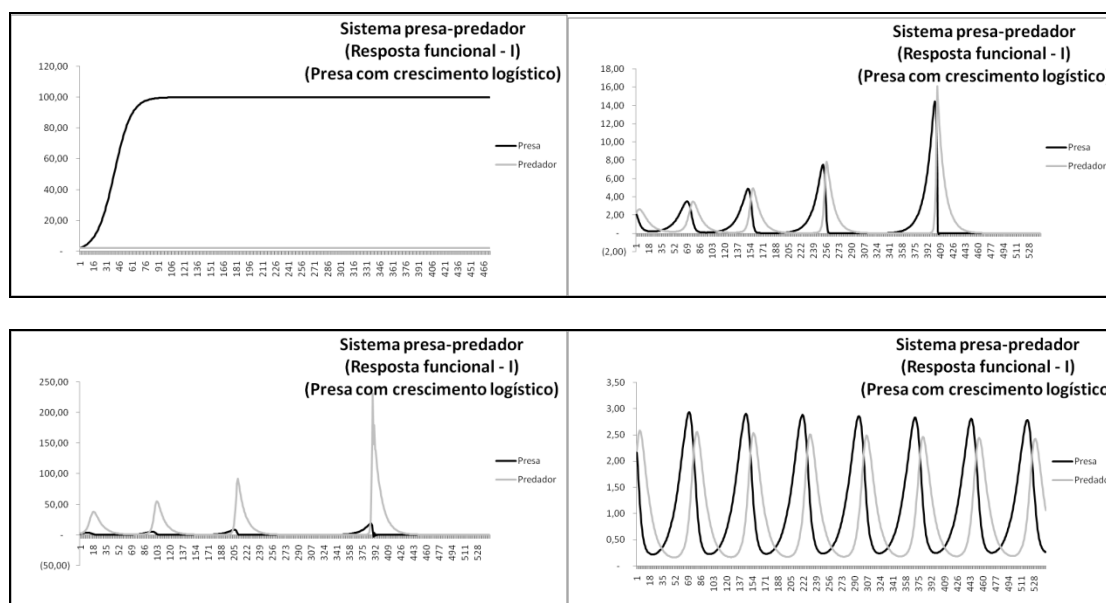
A população da presa na natureza tende a se comportar seguindo os moldes da curva logística, como qualquer população que dependa dos recursos disponíveis de seu ambiente. Ecologicamente diríamos que a população da presa tem regulação populacional dependente da densidade e a única interferência biológica sobre esta (pelo menos para esse modelo inicial) é a atividade predatória. O termo de regulação dependente da densidade é exatamente o termo criado por Verhulst (Figura 3). Inserido em  $\frac{dV}{dt}$ :

$$\frac{dV}{dt} = rV \left( \frac{K-V}{K} \right) - aPV \text{ e } \frac{dP}{dt} = bPV - dP$$

Verifica-se a forma discreta análoga:

$$V_{t+1} = N_t \left[ 1 + R - \frac{RV_t}{K} \right] - aV_t P_t$$

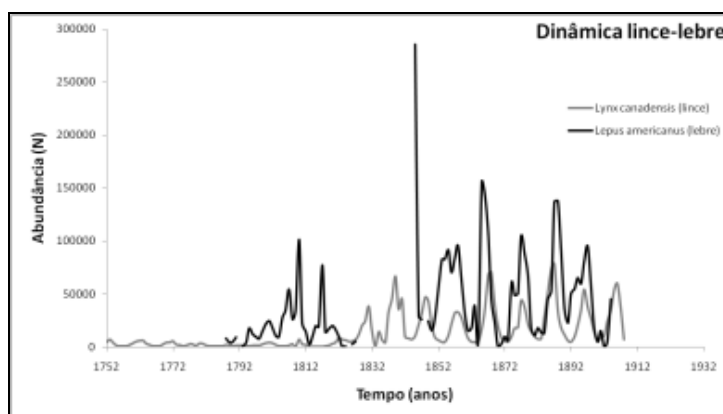
$$P_{t+1} = P_t [1 - d + bV_t]$$



**Figura 3.** Sistema presa-predador de Lotka-Volterra com presa crescendo logisticamente. Parâmetros do crescimento populacional para população de presa:  $R$  (taxa de crescimento per capita);  $K$  (capacidade suporte). Parâmetros de crescimento populacional para população de predador:  $a$  (coeficiente de ataque);  $b$  (coeficiente de conversão de energia);  $d$  (taxa de natalidade do predador). Para todas as figuras  $R = 0,1$  e  $K = 100$ . a)  $a = 0$ ,  $b = 0$ ,  $d = 0$ . A presa cresce logisticamente e com isso é garantido recursos para o predador. b)  $a = 0,1$ ,  $b = 0,1$ ,  $d = 0,1$ . Surge um ciclo populacional, porém as duas populações não se sustentam e ambas se extinguem. c) São mantidas as mesmas condições de  $b$ , alterando-se apenas o coeficiente de ataque para  $a = 0,01$ . Novamente surge um ciclo populacional com amplitudes bem diferenciadas, porém ambas as populações se extinguem. d)  $R = 0,1$ ,  $K = 11$ ,  $a = 0,1$ ,  $b = 0,1$  e  $d = 0,1$ . Essas são as condições encontradas para que ambas as populações se sustentem.

O modelo mostra que é possível que as duas populações (presa e predador) persistam, mas há certos valores que os parâmetros devem tomar para que os ciclos garantam a permanência das populações ao longo do tempo. Dependendo de como se manipulam os parâmetros, a dinâmica das populações assume comportamentos bem diferentes, porém, pergunta-se: tais dinâmicas existem na natureza? A resposta também é afirmativa e podemos relembrar o exemplo clássico do sistema lebre-lince (Figura 4). O ciclo populacional entre a lebre-americana (*Lepus americanus*) e o predador especialista lince-canadense (*Lynx canadensis*) é o indício mais claro de que o sistema presa-predador realmente existe na natureza. Esse ciclo de 10 anos foi obtido trabalhando-se os dados de controle da produção de peles pela Companhia da Baía de Hudson, no Canadá, estabelecida em 1671. O número de peles caçadas, importadas para diferentes lugares do país, foi sempre documentado.

Porém o sistema não é o suficiente para descrever os dados. Atualmente é sabido que é necessário incluir no sistema um modelo para o crescimento do recurso que a lebre precisa (no caso, a planta). Keith, em 1974, criou a hipótese planta-lebre-lince como consequência da interação entre as três cadeias tróficas e os determinantes desses ciclos ainda são estudados (Krebs et al., 2001; Zhang et al. 2007).



**Figura 4.** O ciclo populacional entre a lebre-americana (*Lepus americanus*) e o predador especialista lince-canadense (*Lynx canadensis*). Dados do GPDD (Global Population Dynamics Database) (NERC, 2010).

## Considerações

Não existem leis gerais que abrangem todos os seres vivos estabelecidos nos diversos ecossistemas do globo terrestre, mas existem diversas evidências de que há regras que podem explicar o comportamento de populações ao crescer, ao atingir a capacidade-suporte e/ou flutuar em função da relação consumidor-recurso.

A ecologia de populações e o entendimento de suas dinâmicas são oriundos de princípios estritamente biológicos transformados em parâmetros matemáticos que por sua vez definem o comportamento de certas equações. Qualquer análise de populações biológicas reais deve ser alicerçada nesses parâmetros. Caso contrário, perde-se o alicerce teórico edificado ao longo do tempo pela ecologia.

Há outros parâmetros populacionais (generalizados pela ecologia como fatores bióticos) ou outros parâmetros ambientais (definidos como fatores abióticos) não analisados aqui que podem regular populações biológicas reais: expoente de competição intra-específica, coeficiente de competição interespecífica, efeito de Allee, efeito de Moran, taxa de agarramento da presa, etc. O acréscimo de tais parâmetros nos modelos os torna cada vez mais reais e refletem os dados empíricos com maior fidelidade. Conhecendo os parâmetros necessários para

descreve a dinâmica de uma população ou a dinâmica de uma rede trófica, fica mais fácil antecipar o estresse ambiental.

A quantidade de modelos populacionais descritas na ecologia é vasta e pode ser revista com o intuito de tornar o modelo ainda mais fiel ao comportamento de uma rede trófica real.

## REFERÊNCIAS

Canadian Wildlife Service and U.S. Fish and Wildlife Service. International recovery plan for the whooping crane. Ottawa: Recovery of Nationally Endangered Wildlife (RENEW), and U.S. Fish and Wildlife Service, Albuquerque, New Mexico, 2005. 162 pp.

CLUTTON-BROCK, T. H.; ALBON, S. D.; GUINNESS, F. E. Interactions between population density and maternal characteristics affecting fecundity and juvenile survival in red deer. *Journal Animal Ecology*, v. 56, 857-871, 1987.

DAVIDSON, J. On the ecology of the growth of the sheep population, **Royal Society of South Australia**, v. 62, n. 1, p. 11-148, 1938a.

DAVIDSON, J. On the growth of the sheep population in Tasmania. **Royal Society of South Australia**, v. 62, n. 2, p. 342-346, 1938b.

FENCHEL, T.. Intrinsic rate of natural increase: the relationship with body size. **Oecologia**, v. 14, p. 317-326, 1974.

KEITH, L. B. Some features of population dynamics in mammals. In: KJERNER, I., BJURHOLM, P. (eds). INTERNATIONAL CONGRESS OF GAME BIOLOGISTS, 11<sup>th</sup>., 1974. National Swedish Environment Protection Board, Stockholm, p. 17-58, 1974.

KREBS, C. J. et al. What Drives the 10-year Cycle of Snowshoe Hares? **BioScience**, v. 51, p. 25-35, 2001.

MALTHUS, T. **An Essay on the Principle of Population**. J. Johnson: London, 1798.

MAY, R. M.. Simple mathematical models with very complicated dynamics. **Nature**, v. 261, p. 459-467, 1976

NERC Centre for Population Biology, Imperial College. The Global Population Dynamics Database Version 2. 2010.

NOVAK, M. et al. **Wild Furbearer Management and Conservation in North America**. Ontario Trappers Association: North Bay, Ontario, p. 1168, 1987.

PEARL, R. **The Biology of Population Growth**. Knopf: New York, 1925.

TURCHIN, P. Does population ecology have general laws? **Oikos**, v. 94, p. 17–26. 2001

UNDERHILL, L. G. et al. Regionally coherent trends in colonies of African penguins *Spheniscus demersus* in the Western Cape, South Africa, 1987–2005. **African Journal of Marine Science**, v. 28, n. 3 &4, p. 697–704, 2006.

VERHULST, P.F. Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. **Nouv. mém. de l'Academie Royale des Sci. et Belles-Lettres de Bruxelles**, v. 18, p. 1-41, 1845.

ZHANG, Z.; TAO, Y.; LI, Z. Factors affecting hare-lynx dynamics in the classic time series of the Hudson Bay Company, Canada. **Climate Research**, v. 34, p. 83-89, 2007.