UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Departamento de Biologia e Zootecnia

PLANTAS NATIVAS, EXÓTICAS E CULTIVADAS NO CERRADO SOB CONDIÇÕES DE BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

Texto sistemático crítico evidenciando a evolução das pesquisas realizadas na área, apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para inscrição no concurso de títulos e provas visando à obtenção do título de livre-docente em Ecologia de Ecossistemas pelo Departamento de Biologia e Zootecnia

LUCÍOLA SANTOS LANNES

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Lannes, Lucíola Santos.
L292p Plantas nativas, exóticas e cultivadas no Cerrado sob condições de baixa disponibilidade de nutrientes / Lucíola Santos Lannes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
56 f. : il.

Tese (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Inclui bibliografia

1. Biodiversidade. 2. Campo. 3. Conservação. 4. Fósforo. 5. Savana. 6. Recuperação ambiental. 7. Sustentabilidade agrícola.

Elaborado por Raiane da silva santos - CRB: 8/9999

Para meu primo Heitor e minha sobrinha Maria Cecília

Bluntness makes for conciseness and has other advantages, always provided that it is not malicious and does not overstep the line which separates it from rudeness.

Arthur George Tansley, 1935

(The use and abuse of vegetational concepts and terms, Ecology 16(3): 284–307)

Agradecimentos

Aos estudantes que tive a oportunidade de orientar, que me inspiraram e contribuíram para o trabalho de pesquisa que realizei até aqui: Matheus, Lucas Lopes e Silva, Lucas Ferreira, Danilo, Gustavo, Stef, Eleonore, Jean, Jaqueline, Amanda, Juan, Miguel, Viktória, Roberto, Isabela, Caroline, Marcos Vinicius, Rafael, Melissa, Maria Gabriela, Renan, Lana, Tiago, Rhaniére, Marytze, Giselle, Lisanne, Bianca, Dirk, Elisa, Laura, Luísa, Júlia, Thaisa, Denis, Alexandra.

À professora Glauca Torres Aragon, minha orientadora na graduação e no mestrado na Universidade Estadual do Norte Fluminense, que me ensinou as bases da profissão e com quem tenho muito prazer em conviver. Ao professor Harry Olde Venterink, meu supervisor de doutorado, por ter me ensinado parte substancial do que sei sobre a Ecologia de Ecossistemas, e pela sólida parceria que temos. Ao professor Peter Edwards, meu orientador de doutorado, pelo entusiasmo e por ter um dia me dito que eu deveria seguir carreira acadêmica. À professora Mercedes Bustamante, minha co-orientadora de doutorado, meu exemplo de pesquisadora.

À banca examinadora, composta pelos professores doutores Sérgio Luís de Carvalho, Kátia Luciene Maltoni, Vânia Regina Pivello, Roberto Brandão Cavalcanti e Paulo Sérgio Moreira Carvalho de Oliveira, por me auxiliar a realizar a reflexão que o concurso de livre-docência requer.

À minha família agradeço por toda a orientação que me deu na infância, fundamental para que eu tenha desenvolvido o prazer de estudar, e pelo carinho e admiração nos dias de hoje. Em especial, agradeço à minha avó Arlette Coutinho Lannes e à minha tia Regina Auxiliadora Lannes Barreto Pereira pela dedicação quanto à minha educação quando criança, por terem enxergado em mim capacidades que eu mesma hesitava em acreditar que possuía e por terem me inspirado com qualidades que tentei levar comigo em cada etapa dessa trajetória.

À minha grande amiga Cristiéle da Silva Ribeiro, por ser minha fortaleza em momentos de dúvida, por suas palavras sempre encorajadoras e pelo carinho incondicional que nunca faltou. Sua amizade é um presente inestimável, e seu apoio foi essencial para que eu pudesse enfrentar cada desafio ao longo desta jornada. Obrigada por estar ao meu lado, celebrando as vitórias e iluminando os dias difíceis com sua presença.

Aos amigos que constituem a família que escolhi, pelo suporte e amor: Andréia Alves Rezende, Thaís Duarte Bifano, Gisela Rodrigues Tavares, Martina Oberhofer, Alexandra Völkle, Dorota Niedzwiecka, Manoel Menezes, Adriana Jardim e Kristel Perreijn.

Aos colegas e amigos da UNESP câmpus Ilha Solteira por me proporcionarem um ambiente de trabalho estimulante.

Aos pesquisadores das redes *Nutrient Network* (*NutNet*) e *Functional Ecology and Conservation of Cerrado Plants* (*FECC*) por compartilharmos inspirações para tentarmos responder a questões complexas em Ecologia.

Às entidades financiadoras da minha pesquisa: Vrije Universiteit Brussel (VUB), Fibria Celulose S/A (atual Suzano), CNPq, CAPES e UNESP.

Resumo

Disponibilidade de nutrientes e herbivoria são importantes fatores determinantes das comunidades vegetais em ecossistemas campestres e savânicos, ricos em biodiversidade vegetal e ameaçados pela invasão por gramíneas exóticas e expansão da agropecuária. Esta tem sido responsável pela eutrofização de ambientes terrestres, promovendo aumento de biomassa vegetal, que excede o consumo por herbívoros. Em comunidades naturais no Cerrado, a adição de fósforo causa expansão de gramíneas exóticas invasoras em detrimento das espécies nativas, promovendo homogeneização da flora e prejudicando serviços ecossistêmicos. Em ambientes não fertilizados, estratégias naturais de plantas nativas para lidar com baixas concentrações de fósforo no solo são exploradas pelas gramíneas exóticas para invadir o Cerrado, mas também podem ser importantes mecanismos promotores de produtividade em plantas de interesse agrícola. Estudos ecológicos envolvendo diversos aspectos das respostas das plantas à baixa disponibilidade de nutrientes no solo são necessários para a conservação da biodiversidade vegetal em ecossistemas campestres. Além disso, servem como subsídios para buscar, em plantas cultivadas, estratégias para superar a limitação nutricional e hídrica, que permitam o desenvolvimento de uma agricultura com base em menor utilização de insumos, e auxiliar no processo de recuperação de áreas degradadas.

Palavras-chave: biodiversidade, campo, conservação, fósforo, savana, recuperação ambiental, sustentabilidade agrícola

Abstract

Nutrient availability and herbivory are important factors determining plant communities in grassland and savanna ecosystems, which are rich in plant biodiversity but threatened by the invasion of exotic grasses and agricultural expansion. Unsustainable agricultural practices have been responsible for the eutrophication of terrestrial environments, promoting increases in plant biomass, which exceeds consumption by herbivores. In natural communities in the Cerrado, the addition of phosphorus causes the expansion of invasive exotic grasses, jeopardizing native species, promoting homogenization of the flora and impairing ecosystem services. In unfertilized environments, natural strategies of native plants to deal with low concentrations of phosphorus in the soil are exploited by exotic grasses to invade the Cerrado, but they can also be important to enhance productivity in plants of agricultural interest. Ecological studies approaching different aspects of plant responses to low nutrient availability in the soil are necessary for the conservation of plant biodiversity in grassland ecosystems. In addition, they provide subsidies to search for natural strategies that cultivated plants have to overcome nutrient limitation, allowing the development of a more sustainable agriculture, based on lower supplies, mainly nutrients, and assist in the process of recovering degraded areas.

Keywords: biodiversity, conservation, environmental restoration, grasslands, phosphorus, sustainable agriculture

Sumário

Preâmbulo 10

1. Introdução 11

2. Minhas contribuições para a área 17

2.1. Limitação nutricional de plantas nativas e exóticas o Cerrado 17

2.2. Um novo mecanismo para explicar invasões biológicas em áreas de alta biodiversidade e pobres em fósforo mineral 23

2.3. Efeitos da fertilização modulada por herbivoria sobre áreas campestres em uma abordagem global - resultados da participação na rede *Nutrient Network* (*NutNet*) 27

2.4. Conhecimento sobre estratégias de plantas silvestres aplicado à agricultura de baixa utilização de fertilizantes no Cerrado 30

2.5. Conclusão e perspectivas 36

3. Referências bibliográficas 39

Anexos 53

Preâmbulo

A definição do tema deste texto sistematizado, “Plantas nativas, exóticas e cultivadas no Cerrado sob condições de baixa disponibilidade de nutrientes”, foi realizada com o auxílio da nuvem de palavras que consta na Figura 1. Esta se trata de uma representação visual de texto onde a frequência das palavras é demonstrada através do tamanho das mesmas na imagem. As palavras utilizadas para formar a nuvem consistiram de todos os títulos e palavras-chave dos artigos publicados após a obtenção do título de doutora, ou seja, de 19 artigos, publicados entre 2012 e 2023.

Considerando as palavras que apresentaram maior destaque na nuvem de palavras, restringi o presente texto sistematizado aos efeitos mútuos dos nutrientes e da herbivoria sobre a biodiversidade e a invasão por espécies exóticas, além da aplicação de conhecimentos sobre estratégias de plantas silvestres rumo ao desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável no Cerrado brasileiro. Acredito que estes assuntos são complementares e permeáveis a uma outra abordagem importante regionalmente e que também incluí no texto, que é a recuperação de área degradada.



Figura 1 – Nuvem de palavras utilizada para a escolha do tema abordado no presente texto.

1. Introdução

O termo “ecologia” foi utilizado pela primeira vez pelo zoólogo alemão Ernst Haeckel para designar um ramo das Ciências Biológicas que estuda como organismos se relacionam entre si e com o seu ambiente (HAECKEL 1866). Quase um século mais tarde, o ecólogo norte-americano Charles Krebs ampliou a definição do termo como sendo o estudo científico das interações que determinam a distribuição e a abundância dos organismos (KREBS 1972). Embora a Ecologia seja um ramo da Biologia, ela conecta as Ciências Naturais e Sociais (Howard ODUM 1977).

A Ecologia nos permite estudar os ecossistemas, palavra utilizada pela primeira vez em 1935 pelo ecólogo britânico Arthur Tansley para designar como sistema ecológico (ou ecossistema) os animais e as plantas em grupos juntamente com os fatores físicos dos seus arredores (TANSLEY 1935). Como fatores determinantes da funcionalidade dos ecossistemas estão a comunidade, o fluxo de energia e a ciclagem de nutrientes (Eugene ODUM 1953).

Nutrientes circulam entre os meios biótico e abiótico do ecossistema seguindo os fluxos de energia intrínsecos aos processos de fotossíntese e respiração. A ciclagem de nutrientes é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas, pois garante a disponibilidade contínua de material essencial para os organismos, agindo como determinante da produtividade primária e a fertilidade do solo. É um processo complexo e dinâmico influenciado por fatores bióticos e abióticos, perturbações naturais e atividades humanas, que podem alterar a disponibilidade, a distribuição e o movimento de nutrientes, tais como herbivoria, atividade microbiana, liberação de exsudatos radiculares, clima, solo, topografia, aplicação de fertilizantes e invasão por espécies exóticas.

Áreas campestres e savânicas são importantes ecossistemas globais. Estas compreendem mais de 40% da superfície terrestre (WHITE *et al.* 2000; SUTTIE *et al.* 2006; BLAIR *et al.* 2014), abrigam alta porcentagem da biodiversidade mundial e fornecem numerosos serviços

ecossistêmicos (BENGTSSON *et al.* 2019; RICHTER *et al.* 2024), por exemplo, armazenando mais de 30% de todo o carbono terrestre (ESWARAN *et al.* 1993; WHITE *et al.* 2000). No entanto, estes ecossistemas têm sido frequentemente negligenciados (PARR *et al.* 2014) e alterados por atividades antrópicas, como a conversão para utilização agropecuária que geralmente é associada à entrada de nutrientes via fertilização (FOLEY *et al.* 2011; BARDGETT *et al.* 2021). Para aumentar a produtividade agrícola e a produção de alimento para a pecuária, as entradas de nitrogênio e fósforo nestes ecossistemas aumentaram significativamente em comparação aos níveis pré-industriais (VITOUSEK *et al.* 1997; GALLOWAY *et al.* 2004; WANG *et al.* 2015).

A abundância e a distribuição de herbívoros em campos e savanas também vêm sendo amplamente alteradas por mudanças no uso da terra, com reduções de densidade dos mesmos ocorrendo via caça ou substituição por animais de produção (WASSENAAR *et al.* 2007; GIBSON 2009; NEELY *et al.* 2009; FOLEY *et al.* 2011). A importância dos herbívoros em áreas campestres é diversa, podendo impactar a ciclagem de nutrientes ao consumir o material vegetal e modificar a quantidade e a qualidade da matéria orgânica no solo, via deposição de fezes, por exemplo (BARDGETT e WARDLE 2010; SITTERS *et al.* 2020).

O Cerrado brasileiro (ou Cerrado *lato sensu*) compreende aproximadamente 20% do território brasileiro e faz fronteira com outros importantes biomas brasileiros: Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga e Pantanal. É também onde se encontram as nascentes do rio Amazonas, Paraguai e São Francisco. O Cerrado é equivocadamente denominado como a “savana brasileira”, pois apresenta um amplo espectro vegetacional, variando de florestas a campos, passando por vegetações savânicas (EITEN 1972; RIBEIRO e WALTER 1998). Uma destas vegetações savânicas denomina-se cerrado *sensu stricto*, daí o equívoco de reduzir o bioma Cerrado a savana. O Cerrado localiza-se em uma área de forte sazonalidade, com 90% das chuvas concentradas de novembro a março. Apresenta solos bastante diversos, mas os predominantes são os latossolos, bem-drenados, profundos, vermelhos ou amarelos, ricos em argila,

estruturalmente fortes mas pobres em nutrientes minerais. Estes solos antigos e bastante intemperizados apresentam baixíssimas concentrações de fósforo mineral (GOEDERT 1983; RESENDE *et al.* 2011), embora sejam ricos em fósforo orgânico (CHAPUIS-LARDY *et al.* 2001; RESENDE *et al.* 2011). Além disso, as frações argilosas desses tipos de solo são ricas em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com alta capacidade de adsorção de fósforo (GOEDERT 1983).

Por diversas razões, ecólogos assumem que o fósforo é o nutriente mais limitante para plantas do Cerrado: além dos solos serem muito pobres em fósforo, plantas apresentam baixíssimas concentrações deste nutriente em seus tecidos (BATMANIAN e HARIDASAN 1985; VILLELA e HARIDASAN 1994) e muitas espécies exibem estratégias de conservação do mesmo, como alta taxa de reabsorção foliar (KOZOVITS *et al.* 2007) e alta eficiência de uso (NARDOTO *et al.* 2006). Contudo, uma vez que os latossolos altamente intemperizados do Cerrado são também geralmente pobres em outros nutrientes, incluindo nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes (GOEDERT 1983; HARIDASAN 1992; LILIENFEIN *et al.* 2001), é importante considerá-los também como possíveis nutrientes limitantes ou co-limitantes para as plantas. Entender como a limitação por nutrientes varia entre os grupos funcionais de plantas em áreas de alta biodiversidade é importante para o manejo dessas comunidades face às mudanças ambientais correntes.

Estima-se que haja 160.000 espécies de plantas, animais e fungos no Cerrado (DIAS 1992; PENNINGTON *et al*. 2006), incluindo 12.775 espécies de plantas vasculares (FLORA E FUNGA DO BRASIL 2024). A diversidade de espécies varia entre fitofisionomias (RATTER 1987; MANTOVANI 1990; MANTOVANI e MARTINS 1993), com as comunidades do estrato rasteiro sendo as mais biodiversas. Juntas, elas contêm pelo menos 4.700 espécies (MENDONÇA *et al.* 2008). Esta diversidade de espécies traz consigo uma grande gama de adaptações para lidar com a escassez de nutrientes no solo.

Sendo o caráter de absorção e utilização de nutrientes muito variável de espécie para espécie, dependendo principalmente da genética e dos processos que são utilizados pela planta para mitigar a deficiência de nutrientes no solo, algumas plantas possuem a capacidade de solucionar este problema com diversas adaptações morfológicas e fisiológicas para explorar as diferentes frações do solo, como modificações estruturais radiculares, exsudação de prótons e ácidos orgânicos, associação micorrízica, formação de raízes proteóides e a secreção de fosfatase ácida (LAMBERS *et al.* 2006; BALEMI e NEGISHO 2012).

A invasão de ecossistemas naturais por plantas exóticas é um grande componente da mudança ambiental global (VITOUSEK *et al.* 1997; MACK *et al.* 2000; ROCKSTRÖM *et al.* 2009) e impõe séria ameaça à biodiversidade (CHAPIN *et al.* 2000; SALA *et al.* 2000), portanto, entender mecanismos que governam invasões por plantas em ambientes naturais se tornou uma prioridade na pesquisa ecológica mundial nas últimas décadas. A invasão por espécies exóticas, especialmente pelas gramíneas africanas *Melinis minutiflora* e *Urochloa eminii* (= *Urochloa decumbens*), tem sido grande agente de mudanças ambientais, prejudicando a biodiversidade e a função de ecossistemas no Cerrado (PIVELLO *et al.* 1999a; PIVELLO *et al.* 1999b; DURIGAN *et al.* 2007; BUSTAMANTE et al. 2012; FRANCO *et al.* 2024). Esforços têm sido realizados para quantificar tais impactos (DAMASCENO *et al.* 2018; ASSIS *et al.* 2020; GARCIA *et al.* 2022) e entender os mecanismos que governam o sucesso das invasões (DEZOTTI *et al.* 2024).

A herbivoria exerce um grande impacto nas comunidades vegetais do Cerrado, não somente através do efeito direto sobre o crescimento e reprodução de plantas, mas também através da potencial interação com fatores abióticos, como a promoção da modificação da qualidade do solo e disponibilidade hídrica (FRANCO 1998). Existem poucos dados sobre herbivoria no Cerrado, a maioria sobre formigas e cupins, que sugerem que estes exercem a função de maiores herbívoros neste bioma (MARQUIS *et al.* 2001). Os principais ungulados presentes na maioria das áreas campestres e savânicas do Cerrado são a paca (*Cuniculus paca*),

veado-mateiro (*Mazama americana*), veado-campeiro (*Ozotoceros bezoarticus*), capivara (*Hydrochoerus hydrochaeris*) e anta (*Tapirus terrestris*), mas os estudos sobre eles no Cerrado não foram além de análises de dieta e descrições da composição das comunidades (RODRIGUES e MONTEIRO-FILHO 1999). Nas savanas da África, Índia e Ásia predominam herbívoros ungulados que moldam a vegetação, exercendo impacto significativo sobre a composição de espécies, portanto mais estudos serão fundamentais para entender as funções desses herbívoros como moduladores dos efeitos dos nutrientes sobre as comunidades campestres de Cerrado.

O Cerrado enfrenta perdas crescentes de biodiversidade e destruição de habitat, principalmente devido à expansão agrícola, especialmente desde a década de 1960 (MYERS *et al.* 2000; STRASSBURG *et al.* 2017). A agricultura no Cerrado é altamente mecanizada e os solos são tratados com calagem e fertilização para reduzir acidez do solo e toxicidade de alumínio, além de aumentar a fertilidade (RATTER *et al.* 1997). As culturas mais importantes são soja, milho e cana-de-açúcar, mas a maior parte das terras de produção são destinadas à pecuária. As práticas agropecuárias exercem grandes impactos sobre a estrutura e o funcionamento da vegetação natural do Cerrado. O Cerrado apresenta 8,21% de seu território legalmente protegidos por unidades de conservação; desse total, 2,85% são unidades de conservação de proteção integral e 5,36% de unidades de conservação de uso sustentável (MMA, 2024), o que é menos do que o necessário para assegurar a manutenção desse bioma, que encontra-se em estado alarmante de degradação ambiental.

Como são baixas as concentrações de fósforo “disponível” nos solos do Cerrado, os fertilizantes minerais fosfatados são frequentemente utilizados na agricultura para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo, incrementando assim o rendimento das culturas (PEÑUELAS *et al*. 2020). O uso do fósforo para a fertilização do solo se torna cada vez mais preocupante, pois este mineral possui reservas finitas e apresenta cada vez mais importância devido à sua alta demanda. Ainda não é possível saber exatamente o quanto ainda existe desse mineral, porém

com base nas últimas análises acredita-se que uma grande crise do fósforo terá início já por volta do ano de 2060 (GILBERT 2009), podendo ainda ser considerado instrumento de segurança alimentar nos países, acarretando uma alta exponencial dos preços (MEW 2016; CORDELL *et al.* 2011; CEASAR 2018).

Os fertilizantes fosfatados são caros, apresentam reservas finitas e são potencialmente pouco eficazes devido à imobilização pelo solo. Sua utilização se torna cada vez mais preocupante, devido à falta de informações concretas sobre a quantidade das reservas fosfatadas e das previsões de fim das reservas mais limpas até o fim do século, podendo acarretar alta exponencial dos preços, devido ao maior custo para mineralização de fontes menos limpas e dos países considerarem as reservas como instrumento de segurança alimentícia. Estes fatos evidenciam a importância de melhorar a eficiência das cultivares agrícolas para aquisição e utilização do P, com intuito de reduzir os impactos ambientais e diminuir o consumo das reservas globais de P (VENEKLAAS *et al.* 2012; LOPES e GUILHERME 2016).

Uma maneira pela qual as plantas aumentam a eficiência de aquisição de P é liberando fosfatases, as quais catalisam a hidrólise de fósforo orgânico, transformando-o em formas inorgânicas. As fosfatases estão presentes no solo, sendo secretadas pelas raízes das plantas e por microrganismos do solo. As fosfatases são responsáveis pela mobilização ativa de fontes orgânicas de fósforo, clivando grupamentos fosfato de monoésteres e diésteres de fósforo, aumentando a absorção de fósforo pela planta a partir de fontes não imediatamente disponíveis, tornando possível a redução do uso de fertilizantes fosfatados em culturas agrícolas (TARAFDAR e CLAASSEN 2001; RICHARDSON *et al.* 2011; WEI *et al.* 2020). De fato, uma grande parte do fósforo assimilado é advindo do processo de mineralização pelas fosfatases (ADETUNJI *et al.* 2017). Existe um corpo crescente de estudos recentes enfatizando que a conservação da biodiversidade faz aumentar a atividade de fosfatase e a disponibilidade de fósforo inorgânico no

solo, sendo promissora para a geração de conhecimento visando subsidiar a melhoria da produtividade em sistemas agrícolas com baixa utilização de insumos (CHEN *et al.* 2022).

Em relatório publicado no ano de 2021, resultado de um esforço conjunto sem precedentes entre os dois principais comitês científicos ambientais do mundo, o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) e a IPBES (Plataforma Intergovernamental sobre a Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos) propõem soluções comuns para o enfrentamento das crises do clima e da biodiversidade. Como diretiva principal apontada por este relatório está a restauração da vegetação nativa em áreas que foram destruídas (PÖRTNER *et al.* 2021).

Neste texto sistemático serão apresentados resultados de pesquisas envolvendo aspectos da limitação nutricional de plantas nativas e exóticas, bem como mecanismos utilizados por plantas para invadirem áreas nativas e degradadas no Cerrado. Serão também demonstrados como estes estudos podem servir de subsídios para a aplicação do conhecimento relativo às estratégias de plantas nativas visando o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável e a recuperação de áreas degradadas. São também apresentados resultados de trabalhos envolvendo o efeito da fertilização e herbivoria sobre aspectos da ecologia de áreas campestres em uma perspectiva global.

2. Minhas contribuições para a área

2.1. Limitação nutricional de plantas nativas e exóticas o Cerrado

Dois grupos ecológicos de relevância para conservação de ecossistemas campestres e savânicos são espécies ameaçadas de extinção e espécies exóticas invasoras. No estudo de LANNES *et al.* (2012), analisamos a distribuição destes dois grupos em relação à biomassa e à estequiometria nitrogênio:fósforo (razão N:P) na vegetação em 60 áreas de Cerrado no planalto

central. Eles ocuparam extremos opostos em relação às variáveis analisadas, com espécies ameaçadas de extinção ocorrendo em vegetações com altas razões N:P e baixas biomassas e espécies exóticas invasoras ocorrendo em vegetações com baixas razões N:P e altas biomassas (Ver Figura 1 em LANNES *et al.* 2012).

A restrição de plantas ameaçadas de extinção a áreas com altas razões N:P na vegetação pode ter ocorrido devido a diversos fatores. Uma possibilidade considerada foi a utilização exacerbada de fertilizantes nitrogenados no Cerrado nos últimos anos. De acordo com esse mecanismo, as espécies ameaçadas tiveram sua ocorrência reduzida principalmente devido ao aumento da biomassa da vegetação nessas áreas fertilizadas e persistem somente em áreas onde fósforo é limitante ao crescimento da biomassa, fazendo com que esta permaneça baixa. Alternativamente, o padrão pode ser devido ao fato de que muitas das áreas anteriormente limitadas por fósforo e de baixa biomassa foram modificadas por fertilização fosfatada, deixando somente alguns fragmentos naturais em que as ameaçadas ainda podem ocorrer. Estas eram apenas suposições que emergiram de LANNES *et al.* (2012), pois não havia estudos indicando quais nutrientes limitavam a produtividade no Cerrado, portanto, não se sabia se nitrogênio ou fósforo promovia aumento da biomassa da vegetação levando a perda de biodiversidade.

Espécies exóticas invasoras ocorrendo em áreas de baixa razão N:P indicam que as mesmas se beneficiam em condições de relativa limitação por nitrogênio. As principais espécies invasoras em áreas de Cerrado, as gramíneas de metabolismo C_4 *Urochloa eminii* (= *Urochloa decumbens*) e *Melinis minutiflora*, são conhecidas por apresentarem alta eficiência de uso de nitrogênio em relação a outras gramíneas no Cerrado. Além disso, ocorrem em áreas sujeitas a fogo, que geralmente são limitadas por nitrogênio devido à volatilização. Ainda, é importante lembrar que tanto a família Fabaceae quanto Poaceae são fortemente representadas na flora exótica do Cerrado e ambos os grupos apresentam estratégias para lidar com baixa disponibilidade de nitrogênio, como fixação de nitrogênio e alta eficiência de uso de nitrogênio.

Essas linhas de evidência sugeriram que plantas exóticas invasoras no Cerrado são fortes competidoras sob limitação por nitrogênio, o que pode também ser devido a se beneficiarem mais do que espécies nativas de um aumento de fósforo no solo, suposição que merecia investigação.

O efeito da adição de nutrientes sobre a biomassa de comunidades de Cerrado foi então foco de um próximo estudo. Em LANNES *et al.* (2016), várias combinações de nutrientes (fósforo, nitrogênio e uma mistura de outros macro e micronutrientes) foram aplicadas em seis tipos de vegetação de Cerrado. Esses tipos vegetacionais estudados incluíram (i) campo sujo, (ii) campo sujo frequentemente queimado, (iii) cerrado *sensu stricto*, (iv) cerrado *sensu stricto* frequentemente queimado, (v) uma área campestre já intensamente invadida por espécies exóticas e uma (vi) área dominada por leguminosas. Durante três anos consecutivos, avaliamos de que forma os tratamentos de fertilização afetaram a biomassa aérea de plantas herbáceas nativas e exóticas nestas áreas. Constatamos que somente a adição combinada de nutrientes promoveu o aumento da biomassa aérea total da vegetação, evidenciando-se uma situação de co-limitação por nutrientes. Interessantemente, os dados demonstraram que não somente nitrogênio e fósforo, mas outros nutrientes, até então negligenciados, tinham papel na limitação nutricional de plantas de Cerrado.

No estudo de fertilização em LANNES *et al.* (2016), plantas de diferentes origens foram limitadas por nutrientes diferentes, com as gramíneas invasoras sendo responsivas à adição de fósforo e as gramíneas nativas respondendo à adição de uma combinação de vários nutrientes, surpreendentemente sem nitrogênio ou fósforo (ver Figura 1 em LANNES *et al.* 2016). Este resultado foi inesperado, uma vez que ambos os grupos são de gramíneas compartilhando a mesma via fotossintética, o metabolismo C_4. Solos de Cerrado são especialmente pobres em fósforo disponível com valores com duas ordens de grandeza abaixo de outras áreas similares no mundo. Essa diferença de limitação nutricional entre plantas nativas e invasoras demonstra que as primeiras são adaptadas a essas condições de baixíssima “disponibilidade” de fósforo no solo,

ideia suportada por uma atual crescente gama de publicações sobre especializações radiculares associadas à obtenção de fósforo em plantas de Cerrado. A adição de fósforo ao solo, na realidade, promoveu perda de biomassa de plantas nativas devido ao aumento da biomassa de plantas exóticas invasoras (ver Figura 2 em LANNES *et al.* 2016), vindo ao encontro da observação de LANNES *et al.* (2012), em que a ocupação de extremos opostos por plantas exóticas invasoras e plantas nativas levou à consideração da possibilidade do espalhamento das invasoras ameaçarem a biodiversidade de plantas nativas, uma vez que as invasões poderiam promover aumento da biomassa a níveis acima daqueles em que as nativas poderiam persistir.

Até o estudo de LANNES *et al.* (2016), quase não havia trabalhos demonstrando o efeito da adição de fósforo sobre comunidades vegetais no mundo. Contudo, isso pode ter sido devido a um viés geográfico, uma vez que estudos de fertilização em campo eram realizados prioritariamente na América do Norte e na Europa, áreas onde a limitação por nitrogênio é mais comum. Atualmente, à medida que as pesquisas ecológicas sobre limitação nutricional de comunidades silvestres tropicais avançam, há um crescente interesse pelos efeitos da adição de fósforo sobre comunidades vegetais.

Os dados de LANNES *et al.* (2016), portanto, desafiaram o senso comum de que a vegetação de Cerrado era limitada por escassez de fósforo, mas deixaram a dúvida sobre qual(is) nutrientes(s) poderia(m) limitar a produtividade de gramíneas no Cerrado, pois naquele experimento, potássio, cálcio, magnésio, ferro, manganês, zinco, boro, cobre e molibdênio haviam sido adicionados em conjunto, portanto qual(is)quer desses nutrientes poderia(m) ter limitado ou co-limitado a produtividade naquelas áreas.

Um estudo realizado em uma área de empréstimo localizada na Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira forneceu indicação de qual nutriente poderia ser limitante ao crescimento de gramíneas nativas. Com o objetivo de buscar possibilidades para recuperar aquela área degradada, o estudo de TEIXEIRA, REZENDE e

LANNES (2019) investigou se a deposição de esterco ovino poderia promover incremento da diversidade e/ou biomassa na área de empréstimo resultante da construção da fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira. Naquele local, a remoção de aproximadamente 9 metros do perfil de solo original eliminou efetivamente a vegetação e o banco de sementes de uma grande área (aproximadamente 600 ha). Esse procedimento criou condições edáficas e microclimáticas que prejudicam o processo de sucessão natural na área. Como uma forma de unir esforços no Departamento de Biologia e Zootecnia visando a melhoria das condições do solo na área, optou-se por testar a adição de estercos animais, uma vez que são ricos em nutrientes e água, possíveis fatores limitantes ao desenvolvimento da vegetação no local.

A pesquisa de TEIXEIRA, REZENDE e LANNES (2019) encontrou que a adição de esterco ovino incrementou significativamente a concentração de fósforo no solo e fez aumentar a colonização vegetal nas áreas estudadas, mas devido ao estímulo da espécie exótica invasora *Urochloa eminii* em áreas previamente invadidas, corroborando os dados de LANNES *et al.* (2016) para áreas de Cerrado no planalto central. Uma outra observação realizada neste estudo foi que a concentração do micronutriente boro, dentre 16 variáveis de solo analisadas, foi a única a apresentar incremento em uma área dominada por gramíneas nativas, tendo estimulado o crescimento das mesmas (ver Tabelas 3 e 4 em TEIXEIRA, REZENDE e LANNES 2019). Isso indicou que o boro, um microelemento até então ignorado quanto à possibilidade de limitar produtividade em áreas silvestres, era um candidato a limitar a produtividade de gramíneas silvestres no Cerrado.

Um outro trabalho estudando a adição de esterco para recuperação ambiental na área de empréstimo (FERREIRA *et al.* 2020) identificou que estercos bovino e caprino influenciaram positivamente o crescimento da planta exótica invasora *Urochloa eminii*, enquanto o esterco ovino promoveu o crescimento de gramíneas não invasoras em áreas não previamente invadidas (ver Figuras 1 e 2 em FERREIRA *et al.* 2020). Estes resultados demonstram que a utilização de esterco

animal promove melhores condições nutricionais para plantas que vivem em áreas degradadas, e que a seleção do tipo de esterco a ser utilizado em projetos de recuperação ambiental objetivando incrementar o crescimento vegetal em áreas degradadas dependerá do objetivo da restauração, uma vez que diferentes tipos de esterco favorecem diferentes grupos funcionais de plantas.

A suposição de que o micronutriente boro poderia ser limitante ao crescimento de plantas no Cerrado foi investigada e resultou em LANNES *et al.* (2020a). Este trabalho investigou o efeito da aplicação de boro sobre plantas em um experimento em casa de vegetação e outro em campo, em área degradada próxima ao local onde foi realizado o estudo de TEIXEIRA, REZENDE e LANNES (2019), demonstrando que diversos componentes da vegetação local eram realmente limitados por boro (ver Figura 3 em LANNES *et al.* 2020a), resultado confirmado em experimento em casa de vegetação e que corroborou os resultados de TEIXEIRA, REZENDE e LANNES (2019) e LANNES *et al.* (2016). Uma outra observação resultante desses experimentos com boro consistiu da menor absorção de alumínio por plantas fertilizadas com boro (ver Figura 2 em LANNES *et al.* 2020a), o que estava de acordo com a literatura sobre a relação fisiológica do boro com o alumínio. O mecanismo utilizado para explicar a limitação por este micronutriente reside no efeito do mesmo sobre a toxicidade de alumínio, uma vez que a deficiência por boro contribui para a inibição do alongamento de raízes devido ao acúmulo de alumínio na zona de transição de raízes laterais, conforme demonstraram estudos anteriores.

O trabalho de LANNES *et al.* (2020a) foi também relevante por ter sido o primeiro a demonstrar limitação por boro em monocotiledôneas. Uma limitação deste trabalho, entretanto, está no fato dele não ter sido realizado em uma área natural de Cerrado, mas em uma região degradada com subsolo exposto e contendo um número reduzido de espécies nativas face à alta biodiversidade do Cerrado. Portanto é ainda necessário investigar se padrões semelhantes se aplicam em áreas mais conservadas de Cerrado. Mesmo com essa ressalva que coloco, os resultados deste trabalho contribuíram para entender padrões de limitação nutricional entre

espécies viventes no Cerrado, cujos solos são pobres em fósforo e ricos em alumínio, demonstrando o potencial de micronutrientes como o boro como limitantes do crescimento da vegetação silvestre.

2.2. Um novo mecanismo para explicar invasões biológicas em áreas de alta biodiversidade e pobres em fósforo mineral

Os trabalhos anteriormente mencionados resolveram que a adição de fósforo estimula o desenvolvimento de plantas exóticas invasoras no Cerrado, especialmente das gramíneas *Melinis minutiflora* e *Urochloa eminii* (LANNES *et al.* 2012; LANNES *et al.* 2016; TEIXEIRA, REZENDE e LANNES 2019; FERREIRA *et al.* 2020). Entretanto, observações de campo indicam que tais gramíneas exóticas invadem também áreas não fertilizadas no Cerrado, sugerindo que outro mecanismo, além da adição de fósforo, estimula invasões.

Em áreas degradadas, detectamos com o trabalho de LEITE, CASSIOLATO e LANNES (2019) que plantas de diferentes grupos funcionais diferiram entre si em termos de colonização micorrízica, com a invasora *Urochloa eminii* apresentando colonização mais elevada do que espécies nativas. Esta espécie invasora, ao contrário das nativas, foi mais colonizada por micorrizas em áreas degradadas do que em áreas conservadas (ver Tabela 1 em LEITE, CASSIOLATO E LANNES 2019). O mecanismo de associação com fungos micorrízicos parece então ser eficaz para a colonização desta importante espécie invasora em áreas degradadas no Cerrado.

Em áreas pristinas, a teoria ecológica clássica diz que comunidades vegetais ricas em espécies tendem a ser menos invadidas do que áreas de menor biodiversidade, uma vez que apresentam escassez de elementos de nichos ecológicos disponíveis aos que estão chegando.

Outra observação embasada por muitos dados na teoria ecológica envolvendo invasões por plantas exóticas demonstra que ambientes mais ricos em nutrientes no solo são mais invadidos do que ambientes mais pobres em nutrientes, pois plantas invasoras são melhores competidoras em ambientes mais férteis. Estes cernes da ecologia de invasões, entretanto, não conseguem explicar o porquê de certos ambientes de alta biodiversidade e pobres em nutrientes no solo serem também tão invadidos, como os Llanos venezuelanos, savanas na Austrália e na África do Sul e o Cerrado. O fato desses ecossistemas apresentarem-se invadidos por espécies exóticas sugere que outros processos ecológicos, ainda desconhecidos, atuam.

A diversidade de espécies vegetais pode influenciar a aquisição de recursos numa comunidade vegetal de várias maneiras. Primeiramente, comunidades mais biodiversas têm maior probabilidade de conter uma espécie com características adaptativas superiores para aquisição de recursos, conhecido como efeito de seletividade. Em segundo lugar, comunidades mais biodiversas podem alcançar uma maior aquisição de recursos e produção de biomassa do que comunidades com apenas algumas espécies de plantas através da utilização complementar de recursos como nitrogênio e fósforo. Em terceiro lugar, uma espécie de planta pode facilitar o crescimento de outra através da transferência de recursos entre espécies, ou através de alterações rizosféricas que são benéficas para as plantas vizinhas. Uma comunidade mais biodiversa também apresenta maiores chances de ter tais interações facilitadoras e, portanto, de utilização complementar de recursos. Os efeitos da riqueza de espécies vegetais sobre a disponibilidade de nutrientes também podem estar associados a microrganismos do solo, por exemplo através do aumento da atividade da fosfatase ácida. As fosfatases são enzimas liberadas por plantas e microrganismos e hidrolisam fósforo orgânico em fósforo mineral, aumentando a disponibilidade de fósforo no solo. Pouco se sabia sobre processos de facilitação deste tipo, que potencialmente envolvem diversas espécies, e não se sabia se as plantas exóticas invasoras poderiam se beneficiar deles.

Para investigar esses possíveis fatores que influenciam invasões biológicas em áreas naturais de Cerrado, o trabalho de LANNES *et al.* (2020b) explorou a natureza da facilitação ecológica em um experimento em casa de vegetação e em outro em campo, com a hipótese de que espécies exóticas invasoras eram mais eficazes do que as plantas nativas na exploração de fontes orgânicas de fósforo no solo, seja porque elas próprias têm uma maior atividade de fosfatase radicular, ou porque se beneficiam da atividade da fosfatase de plantas nativas ou de microrganismos do solo.

O estudo de campo de LANNES *et al.* (2020b), realizado em 38 áreas em duas regiões distintas, não revelou relação entre fósforo disponível no solo (Mehlich I) e abundância de espécies exóticas invasoras, apesar do fato de estudos anteriores terem demonstrado que fertilização fosfatada promoveu invasão por espécies (LANNES *et al.* 2016; TEIXEIRA, REZENDE e LANNES, 2019). Na realidade, as análises demonstraram que a abundância de espécies invasoras foi influenciada pela riqueza de espécies nativas de duas formas contrastantes (ver Figura 1 em LANNES *et al.* 2020b). Uma delas se tratou de um efeito negativo direto entre riqueza de espécies nativas e abundância de espécies invasoras, o que está de acordo com a teoria de nicho e resultados de diversos experimentos anteriores realizados por outros autores. A outra foi um efeito positivo indireto da riqueza de espécies mediada pela atividade de fosfatase ácida no solo, sugerindo que espécies invasoras se beneficiam do fósforo liberado através da fosfatase produzida por microrganismos e/ou raízes das plantas.

Para compreender melhor o mecanismo gerador da relação positiva entre riqueza de espécies e fosfatase, bem como o efeito dela sobre as espécies invasoras, foi realizado um experimento em casa de vegetação contendo gramíneas nativas, uma leguminosa e as duas gramíneas invasoras *Melinis minutiflora* e *Urochloa eminii*, em mesocosmos com três indivíduos contendo combinações de uma, duas ou três espécies. Os resultados demonstraram que a riqueza de espécies exerceu um efeito positivo sobre as atividades de fosfatase ácida de todas as plantas

e sobre a absorção de fósforo da comunidade (ver Figura 3 em LANNES *et al.* 2020b), deixando claro que o efeito da biodiversidade sobre a fosfatase observado no campo se deu devido à atividade de fosfatase radicular crescente em áreas de maior biodiversidade, padrão recentemente confirmado, tanto em meta-análises quanto em estudos individuais em outras regiões do mundo. Nos mesocosmos, as diferenças de atividade de fosfatase ácida entre os tratamentos pôde ser explicada por diferenças de morfologia de raiz (ver Anexo 5 em LANNES *et al.* 2020b), uma vez que a fosfatase é mais elevada em células superficiais e nos meristemas apicais das raízes. Uma das espécies exóticas invasoras utilizadas no estudo em mesocosmos, a proeminente invasora *Melinis minutiflora*, produziu maior biomassa nas misturas do que nas monoculturas, dando suporte à observação de campo de que plantas nativas promovem o desempenho de plantas invasoras.

Com LANNES *et al.* (2020b), contribuímos, portanto, para a literatura referente à ecologia de invasões demonstrando que a influência da riqueza de espécies de plantas sobre invasões por plantas exóticas é mais complexa do que se supunha anteriormente, especialmente em solos muito pobres em nutrientes. A riqueza de espécies pode prevenir a invasão por plantas exóticas – em concordância com a teoria de nicho – bem como promover a invasão através de facilitação e/ou complementaridade que permite uma melhor exploração do fósforo orgânico do solo. Se estes mecanismos opostos operam simultaneamente ou em diferentes fases durante o processo de invasão permanece uma questão em aberto. Dado que muitos *hotspots* de biodiversidade estão localizados em áreas com solos pobres em nutrientes, como o Cerrado, futuras investigações deste mecanismo e suas implicações para invasões de plantas exóticas em outras áreas ricas em espécies merecem atenção.

2.3. Efeitos da fertilização modulada por herbivoria sobre áreas campestres em uma abordagem global – resultados da participação na rede *Nutrient Network* (*NutNet*)

Áreas campestres funcionam como sumidouros críticos de carbono atmosférico, são importantes fontes de energia para as cadeias alimentares terrestres e elementos vitais para alimentação humana e produção de combustível. Sua biomassa é controlada por fatores interdependentes que variam no espaço e no tempo, incluindo o clima, a disponibilidade de recursos limitantes, como nitrogênio e fósforo, e interações de plantas com herbívoros. No entanto, as atividades humanas estão alterando estes processos. Por exemplo, a eutrofização de ecossistemas terrestres e a alteração do clima estão modificando a produtividade global desses ecossistemas.

A rede de pesquisa *Nutrient Network* (*NutNet*) é um esforço de pesquisa para abordar este problema de forma coordenada e sistematizada, englobando mais de 130 áreas nos 6 continentes variando desde campos desérticos até a tundra ártica. A *NutNet* tem como meta coletar dados de uma ampla gama de áreas de forma consistente para permitir comparações diretas envolvendo relações ambientais com produtividade e diversidade entre áreas campestres ao redor do mundo. Cada parcela da rede segue um protocolo de fertilização e coleta de dados padronizado e quando esses dados são compilados permitem abordar e lançar luz a diversos aspectos, respondendo a questões importantes em Ecologia. Em 2015, implementei uma dessas áreas em um campo sujo de Cerrado no município de Três Lagoas e desde então atuo como membro coordenadora de área e investigadora principal. As regras para participação na rede incluem colaborar com os pesquisadores envolvidos e seguir o protocolo de fertilização e exclusão de herbívoros, coleta de dados e envio dos mesmos à coordenação geral da rede, localizada na Universidade de Minnesota. As regras de autoria em publicações baseiam-se na participação efetiva dos membros,

que devem obrigatoriamente atuar em pelo menos três das seguintes etapas do processo: (i) elaboração da questão da pesquisa e hipóteses de trabalho, (ii) coordenação de área incluída no estudo, (iii) análise de dados, (iv) escrita do artigo. Todas as informações sobre a rede *Nutnet* podem ser encontradas em https://nutnet.org/. Até o momento, participei junto à rede de quatro artigos já publicados, um aceito e outro correntemente em revisão.

Em BORER *et al.* (2020), analisamos os efeitos da adição de nutrientes e da exclusão de herbívoros vertebrados em 58 áreas campestres experimentais nos 6 continentes. Ambos os processos foram responsáveis por aumentos significativos de biomassa aérea nas comunidades estudadas. Verificamos que os herbívoros foram responsáveis por consumir biomassa produzida pela fertilização, mas que o acúmulo da biomassa induzida por fertilização superou o consumo por herbívoros (ver Figura 2 em BORER *et al.* 2020). Dado que os tamanhos populacionais de herbívoros vêm decrescendo em muitas regiões do mundo devido a fatores como perda de habitat, caça e doenças e não por falta de alimento, a biomassa vegetal produzida devido à eutrofização sem o pastoreio intensivo provavelmente permanecerá sem ser consumida. Somente em áreas de alta intensidade de pastoreio, especialmente naquelas em que herbívoros silvestres e de produção encontravam-se conjuntamente presentes, a herbivoria foi responsável por consumir a biomassa induzida pela fertilização. Adicionalmente, o consumo por herbívoros foi mais elevado em áreas de baixa precipitação e alto teor de nutrientes no solo. Em uma era de desafios em relação a mudanças climáticas e queimadas catastróficas, proporcionadas por acúmulo de material combustível, é importante entender o que controla a biomassa das áreas campestres. No Cerrado, por exemplo, estudos recentes sinalizam mudanças no regime climático, incluindo redução na precipitação média anual e prolongamento do período de estiagem, o que pode resultar em consumo mais elevado da biomassa por herbívoros e influenciar a produtividade.

A maneira como recursos (nutrientes e água) determina o efeito da exclusão de herbívoros em áreas campestres também se mostrou dependente do tempo de pastoreio a que as áreas estão

historicamente submetidas. Em uma investigação em 57 áreas, o estudo de PRICE *et al.* (2022) encontrou que em áreas com histórico longo de pastoreio (mais de 500 anos), a exclusão de herbívoros por cercas reduziu a diversidade vegetal possivelmente devido à redução do banco de sementes, tendo esta resposta sido mais branda em áreas de alta precipitação anual. Ao contrário, o pastoreio não exerceu efeito sobre a riqueza de espécies em áreas de pastoreio recente (menos de 500 anos), como é o caso da área brasileira incluída no estudo (ver Figura 5 em PRICE *et al.* 2022). Nestas percebemos que houve redução na colonização por espécies exóticas com a exclusão dos herbívoros, observação que vem ao encontro dos achados de TEIXEIRA, REZENDE E LANNES (2019) e FERREIRA *et al.* (2020a).

Os bancos de sementes constituem um importante mecanismo mantenedor de biodiversidade. Bancos de semente podem, por exemplo, aumentar a resiliência de populações e comunidades face a mudanças ambientais devido ao estoque temporal no solo. Plantas apresentam diversos mecanismos fisiológicos de dormência que inibem a germinação imediata, o que leva ao acúmulo de sementes no solo e permite que as espécies germinem durante vários anos ou impedem a germinação até que as condições ambientais se tornem favoráveis. Portanto, bancos de sementes podem manter populações até quando elas estão declinando ou desaparecendo, aumentando as chances de recuperação ambiental após perturbações ou após variações climáticas interanuais bruscas. Da mesma forma, os bancos de sementes podem ser importantes para mitigar os efeitos da fertilização e perda de herbívoros sobre a diversidade vegetal.

Embora a área brasileira da *NutNet* não tenha sido incluída nos estudos de ESKELINEN *et al.* (2022), colaborei com um grupo interessado em entender como a fertilização influenciava o banco de sementes em 7 áreas da rede e encontramos que a fertilização promoveu diminuição na riqueza de espécies e na diversidade nos bancos de sementes, promovendo a homogeneização da composição entre as plantas já germinadas e o banco de sementes (ver Figura 6 em

ESKELINEN *et al.* 2022), demonstrando que os mecanismos de estoque temporal são enfraquecidos pela adição de nutrientes e indicando o porquê de algumas áreas em recuperação após fertilização não obterem sucesso no processo de restauração. Este trabalho demonstra também que os efeitos da fertilização por nutrientes sobre a perda de biodiversidade se dão ainda mais prematuramente do que imaginávamos, antes mesmo da germinação das espécies nos ecossistemas.

A mudança global está associada a modificações na produção anual de biomassa vegetal. Combinando dados de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) detectados remotamente desde a década de 1980 com dados de campo de 84 áreas em seis continentes, demonstramos uma divergência cada vez maior em biomassa local variando de +51% a -34% globalmente no trabalho de MACDOUGALL *et al.* (aceito). A biomassa aumentou em locais mais quentes, mais úmidos e ricos em espécies, com estações de cultivo mais longas, enquanto diminuiu em áreas áridas e pobres em espécies (ver Figura 2 em MACDOUGALL *et al.* aceito). As mudanças fenológicas foram generalizadas, revelando transições nos ciclos sazonais. Pastoreio, fertilização e invasões por espécies exóticas prevaleceram em algumas regiões, mas não previram tendências gerais. Áreas campestres estão sofrendo mudanças consideráveis na produção, com implicações para a biodiversidade, o armazenamento de carbono e a segurança alimentar, especialmente em regiões áridas.

2.4. Conhecimento sobre estratégias de plantas silvestres aplicado à agricultura de baixa utilização de fertilizantes no Cerrado

Ecólogos e agrônomos começam a compreender a importância do trabalho em conjunto para desenvolver novas tecnologias e melhorar o conhecimento sobre a nutrição das plantas, com o objetivo de tornar a produção agrícola mais sustentável, especialmente onde a água e os

nutrientes são escassos. Porém, existem muitos desafios a serem superados, como entender a importância de cada uma das áreas no processo e como aplicar os conhecimentos da ecofisiologia das plantas nativas na produção agrícola.

Importantes avanços científicos são utilizados por ambas as áreas, como a Lei do Mínimo de Liebig, associação com micorrizas, genética, teoria da evolução e microscopia, que demonstram que o que importa não é a área do conhecimento em que a descoberta se originou, mas como ela é utilizada, com ambas as áreas se beneficiando do desenvolvimento uma da outra. Portanto, a cooperação entre a Ecologia e a Agronomia contribuirá para uma produção agrícola mais sustentável, consequentemente, impactando menos o ambiente.

Soja, milho e cana-de-açúcar são os três principais produtos agrícolas brasileiros, e foram responsáveis por 71% do valor da produção agrícola do país em 2022, segundo o IBGE. Dados do Ministério da Agricultura e Pecuária revelam que o principal nutriente aplicado no Brasil é o potássio, com 38%, seguido por fósforo, com 33%, e nitrogênio, com 29%, e que em 2020, soja, milho e cana-de-açúcar responderam por 72% do consumo de fertilizantes no país. Estudar como estes nutrientes, ou a falta deles, afeta o desenvolvimento de culturas agrícolas importantes no Brasil é uma forma de subsidiar a possibilidade do desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável no Cerrado, a região mais importante para o desempenho agrícola do país.

Os efeitos combinados do fósforo e análogo de brassinosteróides na fase inicial da cana-de-açúcar foram investigados por FERREIRA *et al.* (2021). Os brassinoesteróides pertencem a uma classe de esteróides com efeitos no aumento da resistência ao frio, doenças, herbicidas, estresse salino, germinação e diminuição do aborto de frutos. Esta pesquisa foi a primeira a demonstrar o efeito sinérgico entre brassinosteróide e fósforo sobre a massa seca aérea de plantas de cana-de-açúcar (ver Tabela 1 em FERREIRA *et al.* 2021). A adição do hormônio vegetal em dose intermediária resultou em um aumento da atividade de fosfatase ácida, mas não foram detectadas relações entre a atividade de fosfatase ácida e a produtividade da cana-de-açúcar.

Algumas linhagens de milho estudadas em LOPES E SILVA *et al.* (2023) apresentaram diferentes respostas à adubação fosfatada quando cultivadas na casa de vegetação e no campo. Embora seus valores de fosfatase radicular tenham sido maiores nos vasos controle do que nos fertilizados em casa de vegetação, tais diferenças não foram detectadas em campo. Uma vez que atividades superiores foram sempre detectadas no campo do que na estufa em ambos os tratamentos, é possível que a maior disponibilidade de nitrogênio no solo no campo quando comparado à estufa possa ter estimulado a atividade da enzima, uma vez que é rica em nitrogênio e, portanto, altamente controlada por este elemento, especialmente quando o teor de P no solo é baixo. Outra possível explicação para a atividade de fosfatase ácida mais elevada observada no campo reside na presença de plantas vizinhas no campo, cujo contato da raiz estimula a atividade de fosfatase, conforme mostrado por LANNES *et al.* (2020b) para plantas silvestres do Cerrado.

O milho possui alta variabilidade genética e pode ser cultivado em diferentes condições ambientais com adaptações específicas e amplas ao ambiente. Possui alto potencial de produtividade e alta demanda por fósforo devido ao seu intenso desenvolvimento e ciclo curto. O trabalho de LOPES E SILVA *et al.* (2023) revelou que o milho utiliza outras estratégias para superar a limitação por fósforo, conforme indicado pela maior atividade da fosfatase radicular em plantas controle em relação a plantas fertilizadas com fósforo. Encontramos nesta pesquisa efeito positivo da atividade de fosfatase ácida radicular sobre o peso de 100 grãos em híbridos não fertilizados com fósforo (ver Figura 3 em LOPES E SILVA *et al.* 2023), demonstrando, pela primeira vez, a importância da atividade desta enzima para a melhoria da produtividade do milho sob condições não fertilizadas e reforça a necessidade de considerar esta variável para a aquisição de fósforo em sistemas agrícolas não fertilizados. Como não é comum que as empresas de melhoramento de plantas testem seus híbridos em condições naturais não fertilizadas e devido ao elevado número de híbridos atualmente disponíveis no mercado, é possível que alguns desses genótipos já apresentem alta eficiência no uso de N e alta atividade de fosfatase ácida radicular que poderiam

torná-los adequados ao uso em sistemas mais sustentáveis e cultivo sem problemas associados à perda de produtividade.

Em LOPES E SILVA *et al.* (2023), demonstramos que há possibilidade de sucesso na seleção de genótipos de milho naturalmente adaptados à baixa disponibilidade de fósforo no solo e concomitantemente de genótipos que têm alta atividade de fosfatase ácida sob fertilização com fósforo para reduzir a quantidade de fósforo inorgânico necessária para produzir milho no Cerrado. Estes poderiam ser úteis para os agricultores que baseiam a sua produção de milho em baixa tecnologia e também beneficiariam os agricultores convencionais, reduzindo a quantidade de fósforo necessária para a produção. Lucas Lopes e Silva, autor principal do referido trabalho, hoje investiga em seu trabalho de doutorado a relação entre disponibilidade de nitrogênio e a atividade de fosfatase ácida no milho, visando testes em híbridos comerciais sem fertilização fosfatada. Considerando que os aumentos atuais de carbono e nitrogênio devido às atividades humanas não são seguidos por aumentos da disponibilidade de fósforo, e que tais estequiometrias desequilibradas podem causar perdas para a agricultura, este trabalho recomenda a geração de variabilidade genética para fosfatase juntamente com a melhoria na eficiência de absorção e uso de nitrogênio, visando aumento de produtividade em sistemas agrícolas mais sustentáveis. O desenvolvimento de genótipos adaptados a sistemas de produção mais sustentáveis em áreas pobres em fósforo no Brasil poderia reduzir a necessidade de fertilização fosfatada, mitigando o processo de eutrofização de áreas naturais de Cerrado adjacentes a terras agrícolas.

Crescimento, biomassa e produtividade são variáveis de interesse prático que refletem e expressão de um fenótipo resultante de tratamentos de fertilização. Entretanto, expressam o resultado final do processo. Mecanismos que baseiam modificações nessas variáveis podem ser atualmente estudados pelas ciências ômicas. A metabolômica e a ionômica refletem o estado fisiológico de uma planta por meio da análise de metabólitos e íons respectivamente. A partir das mesmas, é possível entender e analisar as mudanças iônicas e metabólicas devido às alterações

ambientais. Enquanto os dados de expressão gênica de RNA mensageiro e análises proteômicas fornecem parte das informações dos eventos que ocorrem na célula ou organismo, os perfis metabólico e iônico podem fornecer um panorama geral sobre o estado fisiológico.

O potássio é um macronutriente importante para o crescimento das plantas, por desempenhar um papel vital nos processos metabólicos, bem como por contribuir para a adaptação das plantas aos estresses ambientais. Contudo, é bem reconhecido que concentrações elevadas de potássio na solução do solo podem inibir competitivamente a absorção de cálcio e magnésio pelas plantas, geralmente desencadeando reduções de rendimento e provocando consequências metabólicas notáveis. Portanto, a dosagem correta de potássio para as plantas é um fator muito importante para o desenvolvimento das mesmas. Muitos processos fisiológicos e bioquímicos dependem da disponibilidade de potássio, como regulação da turgidez celular, transporte de solutos, regulação enzimática, fotossíntese, síntese de proteínas e transporte de membrana. Uma nutrição balanceada com potássio pode promover tolerância das plantas a condições de estresse, como inundações, baixas temperaturas, seca e salinidade. Em contraste, a deficiência de potássio em plantas causa estresse oxidativo, modificando fortemente a biossíntese de metabólitos. O potássio é responsável pela ativação de quase 60 enzimas, sendo parte do metabolismo do carbono e do nitrogênio. Em solos sob concentração adequada de potássio, as plantas sintetizam grandes biomoléculas, como celulose, amido e proteínas. Inversamente, sob deficiência de potássio, o número de moléculas pequenas, como açúcares livres, aminoácidos e ácidos orgânicos aumentam. A deficiência de potássio também exerce efeito significativo no metabolismo das plantas, incluindo alterações no perfil, concentração e distribuição de muitos metabólitos em diferentes tecidos. Da mesma forma, há um consenso de que metabólitos especializados são cruciais para suscetibilidade das plantas e defesa contra insetos e patógenos. No entanto, a compreensão dos impactos da disponibilidade de potássio no

metabolismo especializado permanece incipiente quando comparado ao efeito do potássio sobre os aspectos fisiológicos e nos processos primários do metabolismo.

No trabalho de COTRIM *et al.* (2023), investigamos como a deficiência de potássio modificou o perfil metabolômico e ionômico da soja. A disponibilidade de potássio influenciou 51 metabólitos primários e especializados atuando em 19 processos metabólicos. Os mecanismos bioquímicos da soja associados à resposta à deficiência de potássio foram: (i) acúmulo de cálcio, magnésio, ferro, cobre e boro em folhas, (ii) acúmulo de ferro e cobre em sementes imaturas e nas vagens respectivamente, (iii) reprogramação do metabolismos para a síntese de fitoalexinas, como isoflavonas, cumestanos, pterocarpanos e saponinas (ver Figura 9 COTRIM *et al.* 2023), (iv) aumento de aminoácidos, mono- e oligossacarídeos, ácidos benzóicos e isoflavonas nas vagens e (v) acúmulo de L-asparagina em estruturas vegetativas e reprodutivas. Estes resultados sugerem que a reprogramação do metabolismo da soja é associada ao estresse oxidativo causado pela deficiência de potássio, tendo demonstrado aumento de fitoalexinas (agentes anti-oxidantes). Os resultados do trabalho apontam a L-asparagina como um biomarcador promissor da soja sob deficiência por potássio e revelam que o aumento das taxas de fertilização potássicas não promove aumentos substanciais de metabólitos constitutivos especializados na soja.

É imprescindível otimizar o uso de fertilizantes para o cultivo agrícola. Por um lado, a sub fertilização pode causar aumento de demandas por terras agrícolas, incentivando o desmatamento. Por outro lado, a super fertilização aumenta os custos de produção, promove perda de biodiversidade, causa poluição hídrica e aumenta as emissões dos poluentes óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Uma estratégia promissora para alcançar o equilíbrio é a agricultura de precisão, que busca fertilizar quando e onde a produtividade aumenta com o fornecimento de nutrientes (áreas que são limitadas por nutrientes ou responsivas à fertilização) e eliminar fertilização de áreas que não respondem à adição de nutrientes (áreas mais limitadas por água, onde não há incremento de produtividade com fertilização). Implementar a agricultura de precisão

com sucesso requer informações temporais e espaciais sobre os fatores que determinam quando e onde a fertilização aumenta a produtividade.

Conduzimos um estudo de campo no âmbito da rede *NutNet* para testar quando e onde a aplicação de fertilizantes (fósforo, nitrogênio e potássio) falha em aumentar a produtividade (CARROLL *et al.* submetido). Com dados de campo, vários cenários de fertilização de precisão foram modelados visando maximizar a produtividade e evitar situações em que a fertilização é inútil devido à falta de resposta das plantas. Este trabalho foi realizado em 61 áreas campestres nos 6 continentes e capturou gradientes globais de clima, fertilidade e riqueza de espécies. Verificou-se que 26% das unidades experimentais (393 de 1518) não responderam positivamente à adição de fertilizantes em relação aos controles (ver Figura 1 em CARROLL *et al.* submetido) e que áreas mais ricas em espécies responderam melhor à fertilização, enfatizando que a promoção da biodiversidade agrícola é uma possível estratégia para aumentar a resposta a fertilizantes. A análise, entretanto, revelou que a agricultura de precisão é de difícil implementação devido à alta variabilidade na limitação nutricional com o local e com o tempo, e que mais estudos são necessários para aprimorar nossa habilidade em prever acuradamente a dinâmica da limitação nutricional para que estratégias dessa natureza possam ser mais efetivas.

2.5. Conclusão e perspectivas

Os trabalhos que realizei até o momento contribuíram para o entendimento sobre processos envolvendo a utilização de nutrientes por plantas silvestres, especialmente as que vivem no Cerrado. Contribuíram também para entender mecanismos que governam invasões por plantas exóticas em ambientes ricos em biodiversidade e pobres em nutrientes, um problema existente desde o início dos estudos de Ecologia de Invasões (ELTON 1958; RICCIARDI e MACISAAC 2008). Adicionalmente, como um aspecto mais aplicado da minha pesquisa, tenho estudado a

viabilidade da utilização de tais conhecimentos sobre nutrição de plantas silvestres no Cerrado rumo a cultivos agrícolas mais sustentáveis e à recuperação de áreas degradadas.

Lucas Lopes e Silva está em fase final da escrita da tese de doutorado que objetiva estudar aspectos que regulam a atividade de fosfatase ácida no milho em monocultura e em consórcio com gramíneas nativas do Cerrado, visando a substituição do consórcio com a gramínea invasora *Urochloa eminii* por gramínea nativa. Dentre os principais resultados da tese estão: (i) a gramínea nativa de Cerrado *Chloris barbata* demonstra potencial semelhante ou superior à exótica invasora *Urochloa eminii* como acompanhante do milho cultivado em consórcio, (ii) a disponibilidade de nitrogênio e fósforo no solo modula a atividade de fosfatase ácida no milho, e (iii) é possível reduzir o uso do fertilizante fosfatado mediante ao aumento da atividade de fosfatase ácida.

Mudanças climáticas e invasões por espécies exóticas são grandes desafios ambientais atualmente, e as previsões indicam que a porção tropical da América do Sul será a região mais afetada em termos de temperatura e seca. Não se sabe, entretanto, como a seca afetará plantas nativas e exóticas. Estudos recentes sinalizam mudanças no regime climático do Cerrado, incluindo redução na precipitação média anual e prolongamento do período de estiagem, o que podem limitar severamente a estabilidade do ecossistema e a produção agrícola. Matheus Roberto Leite concluiu recentemente seus experimentos de mestrado avaliando o efeito de um gradiente de irrigação (100, 50 e 25% da capacidade do vaso) sobre gramíneas de diferentes grupos funcionais, incluindo as nativas *Chloris barbata* e *Aristida gibbosa*, as exóticas *Urochlo*a *eminii* e *Melinis repens* e as gramíneas cultivadas milho (*Zea mays*) e sorgo (S*orghum bicolor*) e encontra-se em fase de análise de dados.

Juntamente com o ex-estudante de mestrado Danilo Silva Teixeira, eu e a professora Cristiéle da Silva Ribeiro estamos escrevendo um artigo sobre o experimento desenvolvido por ele sobre o efeito do estresse hídrico sobre a remodelação lipídica em diferentes espécies de plantas do Cerrado e entender se plantas nativas, naturalizadas e exóticas invasoras apresentam

estratégias correspondentes ou antagonistas em relação a esse processo. Os resultados deste trabalho demonstram que as plantas alteram seus perfis de ácidos graxos frente ao estresse hídrico, tendendo a deixar as membranas de suas raízes mais permeáveis através da sintetização de ácidos graxos polinsaturados. *Urochloa eminii* apresenta modificações semelhantes às plantas nativas de Cerrado, o que não ocorre com as gramíneas naturalizadas não invasoras. Frente a previsões de secas cada vez mais longas e extremas no Cerrado, esse mecanismo pode conferir às plantas invasoras maior capacidade de sobrevivência e surge como um possível novo mecanismo de invasões biológicas em regiões áridas e ricas em espécies.

Laura Verriez finalizou seus experimentos de campo em Ilha Solteira e encontra-se em Bruxelas realizando a análise de dados e escrita da dissertação de mestrado. Laura estudou de que maneira esterco de animais de produção (bovinos, ovinos e caprinos) influenciam interações entre plantas na dinâmica competitiva entre espécies nativas (*Chloris barbata* e *Aristida gibbosa*), exóticas (*Pennisetum glaucum* e *Andropogon gayanus*) e invasoras (*Urochloa decumbens* e *Melinis minutiflora*), cujos resultados serão potencialmente importantes para auxiliar na recuperação de áreas degradadas.

Os estudantes de iniciação científica Viktória Corrêa Babak e Roberto Carlos Leal Júnior estão estudando, respectivamente a composição florística do estrato arbóreo e herbáceo de uma área submetida a severa degradação ambiental (área de empréstimo) frente a diferentes tipos de tratamentos e concentrações de adição de resíduos (macrófitas aquáticas e cinza de bagaço de cana-de-açúcar). Os dados preliminares do trabalho indicam que ambos os tratamentos promovem o aumento da cobertura vegetal, mas que diferem quanto aos grupos funcionais que estimulam, com espécies exóticas invasoras sendo beneficiadas por resíduos com maior teor de fósforo em relação a nitrogênio.

Os trabalhos na *NutNet* têm sido intensos e frutíferos. Atualmente trabalho em uma pesquisa com o professor Richard Bardgett estudando efeitos da adição de nutrientes sobre

aspectos microbiológicos do solo. Incluir os microrganismos como importantes compartimentos da biota do Cerrado expandirá os horizontes da minha pesquisa tanto no âmbito da pesquisa básica quanto da pesquisa aplicada, uma vez que fungos e bactérias são potenciais agentes causadores de imobilização de nutrientes no solo.

3. Referências bibliográficas

ADETUNJI AT, LEWU FB, MULIDZI R, NCUBE B. The biological activities of β-glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. JOURNAL OF SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION 17(3): 794–807, 2017

ASSIS GB, PILON NAL, SIQUEIRA MF, DURIGAN G. Effectiveness and costs of invasive species control using different techniques to restore cerrado grasslands. RESTORATION ECOLOGY 29: 1–9, 2021

BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. JOURNAL OF SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION 12(3): 547–562, 2012

BARDGETT RD, WARDLE DA. Aboveground-belowground linkages. Biotic interactions, ecosystem processes, and global change. Oxford University Press, Nova Iorque, 2010

BARDGETT RD, BULLOCK JM, LAVOREL S, MANNING P, SCHAFFNER U, OSTLE N, CHOMEL M, DURIGAN G, FRY EL, JOHNSON D, LAVALLEE JM, LE PROVOST G, LUO S, PNG K, SANKARAN M, HOU X, ZHOU H, MA L, REN W, LI X, DING Y, LI Y, SHI H. Combating global grassland degradation. NATURE REVIEWS EARTH AND ENVIRONMENT 1–16, 2021

BATMANIAN GJ. Efeitos do fogo na produção primária e a acumulação de nutrientes no estrato rasteiro de um cerrado. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 1983

BATMANIAN GJ, HARIDASAN M. Primary production and accumulation of nutrients by the ground layer community of cerrado vegetation of central Brazil. PLANT AND SOIL 88: 437–440, 1985

BENGTSSON J, BULLOCK JM, EGOH B, EVERSON C, EVERSON T, O'CONNOR T, O'FARRELL PJ, SMITH HG, LINDBORG R. Grasslands - more important for ecosystem services than you might think. ECOSPHERE 10(2): e02582, 2019

BLAIR J, NIPPERT J, BRIGGS J. Grassland Ecology. In: Ecology and the environment (ed. MONSON RK), Springer, Nova Iorque, 2014

BORER E, HARPOLE WS, ADLER PB, ARNILLAS CA, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, CAMPANA S, DICKMAN CR, DICKSON TL, DONOHUE I, ESKELINEN A, FIRN JL, GRAFF P, GRUNER DS, HECKMAN RW, KOLTZ AM, KOMATSU KJ, **LANNES LS**, MACDOUGALL AS, MARTINA JP, MOORE JL, MORTENSEN B, OCHOA-HUESO R, OLDE VENTERINK H, POWER SA, PRICE JN, RISCH AC, SANKARAN M, SCHUTZ M, SITTERS J, STEVENS CJ, VIRTANEN R, WILFAHRT PA, SEABLOOM EW Nutrients cause grassland biomass to outpace herbivory. NATURE COMMUNICATIONS 11: 6036, 2020

BUSTAMANTE MMC, DE BRITTO DQ, KOZOVITS AR, LUEDEMANN G, de MELLO TRB, PINTO AS, MUNHOZ CBR, TAKAHASHI FSC. Effects of nutrient additions on plant biomass and diversity of the herbaceous-subshrub layer of a Brazilian savanna (Cerrado). PLANT ECOLOGY 213: 795–808, 2012

CARROLL O, BORER E, SEABLOOM E, HARPOLE WS, WILFAHRT P, ARNILLAS CA, BAKKER J, BLUMENTHAL D, BOUGHTON E, BUGALHO MN, CALDEIRA M, CAMPBELL M, CATFORD J, CHEN Q, DICKMAN C, DONAHUE I, DUPRE ME, ESKELINEN A, ESTRADA C, FAY PA, FRASER E, HAGENAH N, HAUTIER Y, HIRSH-GREEN E, JÓNSDÓTTIR IS, KADOYA T, KOMATSU K, **LANNES LS,** LIANG M, MCCULLEY R, OLDE VENTERINK H, PERI P, POWER S, PRICE J, REN Z, RISCH AC, SONNIER G, VEEN C, VIRTANEN R,

WARDLE G, WHEELER G, YAHDJIAN L, MACDOUGALL AS. Nutrient limitation and the prospects for precision fertilization. Em revisão na NATURE SUSTAINABILITY

CEASAR SA. Feeding world population amidst depleting phosphate reserves: THE ROLE OF BIOTECHNOLOGICAL INTERVENTIONS 12: 51–55, 2018

CHAPIN FSI, ZAVALETA ES, EVINER VT, NAYLOR RL, VITOUSEK PM, REYNOLDS HL, HOOPER DU, LAVOREL S, SALA OE, HOBBIE SE, MACK MC, DIAZ S. Consequences of changing biodiversity. NATURE 405: 234–242, 2000

CHAPUIS-LARDY L, BROSSARD M, QUIQUAMPOIX H. Assessing organic phosphorus status of Cerrado oxisols (Brazil) using 31P-NMR spectroscopy and phosphomonoesterase activity. CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE 81: 591–601

CHEN X, CHEN HYH, CHANG SX. Meta-analysis shows that plant mixtures increase soil phosphorus availability and plant productivity in diverse ecosystems. NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION 6: 1112–1121, 2022

CORDELL D, ROSEMARIN A, SCHRÖDER JJ, SMIT AL. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. CHEMOSPHERE 84: 747–758, 2011

COTRIM GS, GRACA JP, SILVA DM, OLIVEIRA JUNIOR A, CASTRO C, **LANNES LS**, ZOCOLO GJ, HOFFMANN-CAMPO CB. *Glycine max* (L.) Merr. (Soybean) metabolome responses to potassium availability. PHYTOCHEMISTRY 205: 113472, 2023

DAMASCENO G, SOUZA L, PIVELLO VR, GORGONE-BARBOSA E, GIROLDO PZ, FIDELIS A. Impact of invasive grasses on Cerrado under natural regeneration BIOLOGICAL INVASIONS 20: 3621–3629, 2018

DEZOTTI G, FIDELIS A, DAMASCENO G, SIQUEIRA T. Interactive roles of fire seasons and biological invasions in the short-term dynamics of tropical savannas. JOURNAL OF VEGETATION SCIENCE, 35, e13250, 2024

DIAS BFS (1992) Cerrados: uma caracterização. In: Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis (ed. DIAS BFS), FUNATURA-IBAMA, Brasília, 1992

DURIGAN G, FERREIRA DE SIQUEIRA M, FRANCO GADC. Threats to the cerrado remnants. SCIENTIA AGRICOLA 64: 355–363, 2007

EITEN G. The Cerrado vegetation of Brazil. BOTANICAL REVIEW 38: 201–341, 1972

ELTON CS. The Ecology of Invasions of Animals and Plants. Methuen, Londres, 1958

ESKELINEN A, JESSEN M-T, BAHAMONDE HA, BAKKER JD, BORER E, CALDEIRA MC, HARPOLE W, JIA M, **LANNES LS**, NOGUEIRA C, OLDE VENTERINK H, PERI P, PORATH-KRAUSE, A, SEABLOOM EW, SCHROEDER K, TOGNETTI P, YASUI SLE, VIRTANEN R, SULLIVAN LL. Herbivory and nutrients shape grassland soil seed banks. NATURE COMMUNICATIONS 14: 3949, 2023

ESWARAN H, VAN DEN BERG E, REICH P. Organic carbon in soils of the world. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL 57: 192–194, 1993

FERREIRA L, VIÑALES MB, LOPES E SILVA L, **LANNES LS**. Effects of animal manure upon growth of Cerrado plants. REVISTA IBERO-AMERICANA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS 11: 81–88, 2020

FERREIRA L, **LANNES LS,** FIGUEIREDO PAM, FARIA GA, TEIXEIRA MM, GASPARETO RN. Efeitos combinados do fósforo e análogo de brassinoesteróides na fase inicial da cana-de-

açúcar: crescimento e fotossíntese. REVISTA IBERO-AMERICANA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS 12: 517–529, 2021

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < http://floradobrasil.jbrj.gov.br/ >. Acesso em: 1 Jul 2024

FOLEY JA, RAMANKUTTY N, BRAUMAN KA, CASSIDY ES, GERBER JS, JOHNSTON M, MUELLER ND, O'CONNELL C, RAY DK, WEST PC, BALZER C, BENNETT EM, CARPENTER SR, HILL J, MONFREDA C, POLASKY S, ROCKSTRÖM J, SHEEHAN J, SIEBERT S, TILMAN D, ZAKS DPM. Solutions for a cultivated planet. NATURE 478: 337–342, 2011

FRANCO AC. Seasonal patterns of gas exchange, water relations and growth of *Roupala montana*, an evergreen savanna species. PLANT ECOLOGY 136: 69–76, 1998

FRANCO ACS, ROCHA RM, PIVELLO VR, MAGALHÃES ALB, CASTRO CF, NETO CCC, MATOS DMS, BROWN GG, HERINGER G, SAULINO HHL, OLIVEIRA I, BRAGA RR, MIRANDA RJ, MORMUL RP, VITULE JRS. Dataset of the impacts of invasive alien species in Brazil. ECOLOGICAL RESEARCH 39(3): 380–390, 2024

GALLOWAY JN, DENTENER FJ, CAPONE DG, BOYER EW, HOWARTH RW, SEITZINGER SP, ASNER GP, CLEVELAND CC, GREEN PA, HOLLAND EA, KARL, MICHAELS AF, PORTER JH, TOWNSEND AR, VÖOSMARTY CJ. Nitrogen cycles: past, present, and future. BIOGEOCHEMISTRY 70: 153–226, 2004

GARCIA DB, XAVIER RO, CAMARGO PB, VIEIRA SA, PIVELLO VR. Can an invasive African grass affect carbon and nitrogen stocks in open habitats of the Brazilian Cerrado? FLORA 286(1):151968, 2022

GIBSON DJ. Grasses and grassland ecology. Oxford University Press, Nova Iorque, 2009

GILBERT N. The disappearing nutrient. NATURE 461: 716–718, 2009

GOEDERT WJ (1983) Management of the cerrado soils of Brazil: a review. JOURNAL OF SOIL SCIENCE 34: 405–428, 1983

HARIDASAN M. Observations on soils, foliar nutrient concentrations and floristic composition of cerrado sensu stricto and cerradão communities in Central Brazil. In: Nature and dynamics of forest-savanna boundaries (eds FURLEY PA, RATTER JA), Chapman & Hall, Londres, 1992

HAECKEL E. Generelle Morphologie der Organismen: Allgemeine Grundzüge der Organischen Formen; Wissenschaft, Mechanisch Begründet durch die von Charles Darwin Reformierte Deszendenz-Theorie. Berlim: G. Reimer, 1866

KOZOVITS AR, BUSTAMANTE MMC, GAROFALO CR, BUCCI S, FRANCO AC, GOLDSTEIN G, MEINZER FC. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. FUNCTIONAL ECOLOGY 21: 1034–1043, 2007

KREBS CJ. Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance. Harper International, 1972

LAMBERS H, SHANE MW, CRAMER MD, PEARSE SJ, VENEKLAAS EJ. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. ANNALS OF BOTANY 98: 693–713, 2006

LANNES LS, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Alien and endangered plants in the Brazilian Cerrado exhibit contrasting relationships with vegetation biomass and N : P stoichiometry. NEW PHYTOLOGIST 196: 816–823, 2012

LANNES LS, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Native and alien herbaceous plants in the Brazilian Cerrado are (co-)limited by different nutrients. PLANT AND SOIL 400: 231–243, 2016

LANNES LS, OLDE VENTERINK H, LEITE MR, SILVA JN, OBERHOFER M. Boron application increases growth of Brazilian Cerrado grasses. ECOLOGY AND EVOLUTION 10: 6364–6372, 2020a

LANNES LS, KARRER S, TEODORO D, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Species richness both impedes and promotes alien plant invasions in the Brazilian Cerrado. SCIENTIFIC REPORTS 10: 11365, 2020b

LEITE MR, CASSIOLATO AMR, **LANNES LS**. *Urochloa decumbens* has higher mycorrhizal colonization in degraded than in pristine areas in the Brazilian Cerrado. FLORAM 26: 1–7, 2019

LILIENFEIN J, WILCKE W, ZIMMERMANN R, GERSTBERGER P, ARAÚJO GM, ZECH W. Nutrient storage in soil and biomass of native Brazilian Cerrado. JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE 164: 487–495, 2001

LOPES AS, GUILHERME LG. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. ADVANCES IN AGRONOMY 137: 1–72, 2016

LOPES E SILVA L, MALTONI KL, ANDRADE JAC, **LANNES LS**. Potential of root acid phosphatase activity to reduce phosphorus fertilization in maize cultivated in Brazil. PLOS ONE 18: e029254, 2023

MACDOUGALL A, ESCH E, CARROLL O, BONNER C, OHLERT T, SIEWART M, SCHWEIGER A, SULIK J, BORER E, NAIDU D, BAGCHI S, HAUTIER H, WILFAHRT P, LARSON K, OLOFSSON J, CLELAND E, MUTHURKRISHNAN R, O´HALLORAN L, ALBERTI J, ANDERSON TM, ARNILLAS CA, BAKKER JD, BARRIO IC, BIEDERMAN L, BOUGHTON EH, BRUDVIG L, BRUSCHETTI M, BUCKLEY Y, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, CATFORD JA, D'ANTONIO C, DAVIER K, DALEO P, DICKMAN CR, DONOHUE I, ELGERSMA K, EISENHAUER N, ESKELINEN A, ESTRADA C, FAY PA, FEND Y, GRUNER

DS, HAGENAH N, HAIDER S, HARPOLE S, HERSCH-GREEN E, JENTSCH A, KIRKMAN K, KNOPS JMH, LAANISTO L, **LANNES LS**, LAUNGANI R, LKHAGVA A, MACEK P, MARTINA JP, MCCULLEY R, MELBOURNE B, MITCHELL R, MOORE JL, MORGAN JW, MURAINA TO, NIU Y, PARTEL M, PERI PL, POWER SA, PRICE JN, PROBER SM, REN Z, RISCH AC, SMITH N, SONNIER G, STANDISH RJ, STEVENS CJ, TEDDER M, TOGNETTI P, VEEN C, VIRTANEN R, WARDLE GM, WARING E, WOLF AA, YAHDJIAN L, SEABLOOM E. Widening global variability in grassland biomass since 1980s. Aceito pela NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION em 25/06/2024

MACK RN, SIMBERLOFF D, LONSDALE WM, EVANS H, CLOUT M, BAZZAZ FA. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. ECOLOGICAL APPLICATIONS 10: 689–710, 2000

MANTOVANI W. Variação da flora arbustivo-arbórea de diversas fisionomias do cerrado em Itapirina, Estado de São Paulo. Anais do XLI Congresso Nacional de Botânica, pp. 125-135. Sociedade Botânica do Brasil, Curitiba, 1990

MANTOVANI W, MARTINS FR. Florística do cerrado na reserva de Moji Guaçu, SP. ACTA BOTANICA BRASILICA 7: 33–60, 1993

MARSCHNER H, DELL B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. PLANT AND SOIL 159: 89–102, 1994

MARQUIS RJ, DINIZ IR, MORAIS HC. Patterns and correlates of interspecific variation in foliar insect herbivory and pathogen attack in Brazilian cerrado. JOURNAL OF TROPICAL ECOLOGY 17: 1–23, 2001

MENDONÇA RC, FELFILI JM, WALTER BMT, SILVA JÚNIOR MC, REZENDE AV, FILGUEIRA JS, NOGUEIRA PE. Flora vascular do cerrado: um ‘checklist’ com 11.430 espécies. In:

Cerrado ambiente e flora (eds SANO SM, ALMEIDA SP, RIBEIRO JF), Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2008

MEW MC. Phosphate rock costs, prices and resources interaction. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 542: 1008–1012, 2016

MMA – Ministério do Meio Ambiente. O bioma Cerrado. Disponível em: <http://mma.gov.br/biomas/cerrado.html>. Acesso em junho de 2024

MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, DA FONSECA GAB, KENT J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. NATURE 403: 853–858, 2000

NARDOTO GB, BUSTAMANTE MMC, PINTO AS, KLINK CA. Nutrient use efficiency at ecosystem and species level in savanna areas of Central Brazil and impacts of fire. JOURNAL OF TROPICAL ECOLOGY 22: 191-201, 2006.

NEELY C, BUNNING S, WILKES A. Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change. Implications and opportunities for mitigation and adaptation. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, 2009

ODUM EP. Fundamentals of Ecology. Saunders, Filadélfia, 1953

ODUM HT. The Ecosystem, Energy and Human Values. Artigo apresentado na conferência "The Ecosystem, Energy and Human Values Next 100 years" na Rollins College, Winter Park, Florida, 1976. ZYGON: JOURNAL OF RELIGION AND SCIENCE 12(2): 109–133, 1977

PARR CL, LEHMANN CER, BOND WJ, HOFFMANN WA, ANDERSEN AN. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. TRENDS IN ECOLOGY AND EVOLUTION 29: 205–213, 2014

PENNINGTON RT, LEWIS G, RATTER JA. Neotropical savannas and seasonally dry forests. Plant Diversity, biogeography and conservation. CRC Taylor, Nova Iorque, 2006

PEÑUELAS J, JANSSENS IA, CIAIS P, OBERSTEINER M, SARDANS J. Anthropogenic global shifts in biospheric N and P concentrations and ratios and their impacts on biodiversity, ecosystem productivity, food security, and human health. GLOBAL CHANGE BIOLOGY 26(4): 1962–1985, 2020

PIVELLO VR, SHIDA CN, MEIRELLES ST. Alien grasses in Brazilian savannas: a threat to the biodiversity. BIODIVERSITY AND CONSERVATION 8: 1281–1294, 1999a

PIVELLO V, CARVALHO V, LOPES P. Abundance and distribution of native and alien grasses in a “Cerrado” (Brazilian Savanna) biological reserve. BIOTROPICA 31: 71–82, 1999b

PÖRTNER HO, SCHOLES RJ, AGARD J, ARCHER E, ARNETH A, BAI X, BARNES D, BURROWS M, CHAN L, CHEUNG WL, DIAMOND S, DONATTI C, DUARTE C, EISENHAUER N, FODEN W, GASALLA MA, HANDA C, HICKLER T, HOEGH-GULDBERG O, ICHII K, JACOB U, INSAROV G, KIESSLING W, LEADLEY P, LEEMANS R, LEVIN L, LIM M, MAHARAJ S, MANAGI S, MARQUET PA, MCELWEE P, MIDGLEY G, OBERDORFF T, OBURA D, OSMAN E, PANDIT R, PASCUAL U, PIRES APF, POPP A, REYESGARCÍA V, SANKARAN M, SETTELE J, SHIN YJ, SINTAYEHU DW, SMITH P, STEINER N, STRASSBURG B, SUKUMAR R, TRISOS C, VAL AL, WU J, ALDRIAN E, PARMESAN C, PICHS-MADRUGA R, ROBERTS DC, ROGERS AD, DÍAZ S, FISCHER M, HASHIMOTO S, LAVOREL S, WU N, NGO HT. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538, 2021

PRICE JN, SITTERS J, OHLERT T, TOGNETTI P, BROWN CS, SEABLOOM EW, BORER E, PROBER SM, BAKKER ES, MACDOUGALL A, YAHDJIAN L, GRUNER DS, OLDE VENTERINK H, BARRIO IC, GRAFF P, BAGCHI S, ARNILLAS CA, BAKKER JD, BLUMENTHAL DM, BOUGHTON EH, BRUDVIG LA, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, DICKMAN CR, DONOHUE I, GRÉGORY S, HAUTIER Y, JÓNSDÓTTIR IS,

LANNES LS, MCCULLEY LR, MOORE, JL, POWER SA, RISCH AC, SCHUTZ M, STANDISH R, STEVENS CJ, VEEN GF, VIRTANEN R, WARDLE GM. Evolutionary history of grazing and resources determine herbivore exclusion effects on plant diversity. NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION 7: 1–9, 2022

RATTER JA. Notes on the vegetation of the Parque Nacional do Araguaia (Brazil). NOTES OF THE ROYAL BOTANICAL GARDEN 44: 311–342, 1987

RATTER JA, RIBEIRO JF, BRIDGEWATER S. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. ANNALS OF BOTANY 80: 223–230, 1997

RESENDE JCF, MARKEWITZ D, KLINK CA, BUSTAMANTE MMC, DAVIDSON EA. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. BIOGEOCHEMISTRY 105: 105–118, 2011

RIBEIRO JF, WALTER BMT Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Cerrado: ambiente e flora (eds Sano SM, Almeida SP), Embrapa, Planaltina, 1998

RICCIARDI A, MACISAAC HJ. The book that began invasion ecology. NATURE 452: 34, 2008

RICHARDSON AE, LYNCH JP, RYAN PR, DELHAIZE E, SMITH FA, SMITH SE, HARVEY PR, RYAN MH, VENEKLAAS EJ, LAMBERS H, OBERSON A, CULVENOR RA, SIMPSON RJ. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. PLANT AND SOIL 349: 121–156, 2011

RICHTER FJ, SUTER M, LÜSCHER A, BUCHMANN N, EL BENNI N, CONZ RF, HARTMANN M, JAN P, KLAUS VH. Effects of management practices on the ecosystem-service multifunctionality of temperate grasslands. NATURE COMMUNICATIONS 15: 3829, 2024

ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, PERSSON A, CHAPIN III FS, LAMBIN EF, LENTON TM, SCHEFFER M, FOLKE C, SCHELLNHUBER HJ, NYKVIST B, WIT C, HUGHES T, VAN

DER LEEUW S, RODHE H, SÖRLIN S, SNYDER PK, COSTANZA R, SVEDIN U, FALKENMARK M, KARLBERG L, CORELL RW, FABRY VJ, HANSEN J, WALKER B, LIVERMAN D, RICHARDSON K, CRUTZEN P, FOLEY JA. A safe operating space for humanity. NATURE 461: 472–475, 2009

RODRIGUES FHG, MONTEIRO-FILHO E. Feeding behavior of the pampas deer: a grazer or a browser? DEER SPECIALIST GROUP NEWS 15: 12–13, 1999

SALA OE, CHAPIN FSI, ARMESTO JJ, BERLOW E, BLOOMFIELD J, DIRZO R, HUBER-Sanwald E, HUENNEKE LF, JACKSON RB, KINZIG A, LEEMANS R, LODGE DM, MOONEY HA, OESTERHELD M, POFF NL, SYKES MT, WALKER BH, WALKER M, WALL D. Global biodiversity scenarios for the year 2100. SCIENCE 287: 1770–1774, 2000

SIMON MF, PROENÇA C. Phytogeographic patterns of *Mimosa* (Mimosoideae, Leguminosae) in the Cerrado biome of Brazil: an indicator genus of high-altitude centers of endemism? BIOLOGICAL CONSERVATION 96: 279–296, 2000

SITTERS J, WUBS EJ, BAKKER ES, CROWTHER TW, ADLER PB, BAGCHI S, BAKKER JD, BIEDERMAN L, BORER ET, CLELAND EE, EISENHAUER N, FIRN J, GHERARDI L, HAGENAH N, HAUTIER Y, HOBBIE SE, KNOPS JMH, MACDOUGALL AS, MCCULLEY RL, MOORE JL, MORTENSEN B, PERI PL, PROBER SM, RIGGS C, RISCH AC, SCHUTZ M, SEABLOOM EW, SIEBERT J, STEVENS CJ, VEEN GF. Nutrient availability controls the impact of mammalian herbivores on soil carbon and nitrogen pools in grasslands. GLOBAL CHANGE BIOLOGY 26(4): 2060–2071, 2020

STRASSBURG BBN, BROOKS T, FELTRAN-BARBIERI R, IRIBARREM A, CROUZEILLES R, LOYOLA R, LATAWIEK AE, OLIVEIRA FILHO FJB, SCARAMUZZA CAM, SCARANO FR, SOARES-FILHO B, BALMFORD A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION 1(4): 0099, 2017

SUTTIE JM, REYNOLDS SG, BATELLO C. Grasslands of the world. No. 34. Food and Agriculture Organization, Roma, 2005

TANSLEY AG. The use and abuse of vegetational concepts and terms. ECOLOGY 16: 284–307, 1935

TARAFDAR JC, CLAASSEN N. Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE 164(3): 279–282, 2001

TEIXEIRA DS, REZENDE AA, **LANNES LS**. Response of vegetation to sheep dung addition in a degraded Cerrado area. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL 23: 47–52, 2019

VENEKLAAS EJ, LAMBERS H, BRAGG J, FINNEGAN PM, LOVELOCK CE, PLAXTON WC, PRICE CA, SCHEIBLE WR, SHANNE MW, WHITE PJ, RAVEN JA. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. NEW PHYTOLOGIST 195: 306–320, 2012

VILLELA DM, HARIDASAN M. Response of the ground layer community of a cerrado vegetation in central Brazil to liming and irrigation. PLANT AND SOIL 163: 25–31, 1994

VITOUSEK P, HOWARTH R. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? BIOGEOCHEMISTRY 13, 1991

VITOUSEK PM, MOONEY HA, LUBCHENKO J, MELILLO M. Human domination of Earth's ecosystems. SCIENCE 277: 494–499, 1997

WANG R, BALKANSKI Y, BOUCHER O, CIAIS P, PEÑUELAS J, TAO S. Significant contribution of combustion-related emissions to the atmospheric phosphorus budget. NATURE GEOSCIENCE 8:48–54, 2015

WASSENAAR T, GERBER P, VERBURG PH, ROSALES M, IBRAHIM M, STEINFELD H. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE 17: 86–104, 2007

WEI K, CHEN Z, JIANG N, ZHANG Y, FENG J, TIAN J, CHEN X, LOU C, CHEN L. Effects of mineral phosphorus fertilizer reduction and maize straw incorporation on soil phosphorus availability, acid phosphatase activity, and maize grain yield in northeast China. ARCHIVES OF AGRONOMY AND SOIL SCIENCE 67(1): 66–78, 2020

WHITE RP, MURRAY S, ROHWEDER M, PRINCE SD. Pilot analysis of global ecosystems. Grassland ecosystems. World Resources Institute, Washington DC, 2000

Anexos: Artigos de minha autoria citados neste texto sistematizado:

LANNES LS, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Alien and endangered plants in the Brazilian Cerrado exhibit contrasting relationships with vegetation biomass and N : P stoichiometry. NEW PHYTOLOGIST 196: 816–823, 2012

LANNES LS, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Native and alien herbaceous plants in the Brazilian Cerrado are (co-)limited by different nutrients. PLANT AND SOIL 400: 231–243, 2016

TEIXEIRA DS, REZENDE AA, **LANNES LS**. Response of vegetation to sheep dung addition in a degraded Cerrado area. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL 23: 47–52, 2019

FERREIRA L, VIÑALES MB, LOPES E SILVA L, **LANNES LS**. Effects of animal manure upon growth of Cerrado plants. REVISTA IBERO-AMERICANA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS 11: 81–88, 2020

LANNES LS, OLDE VENTERINK H, LEITE MR, SILVA JN, OBERHOFER M. Boron application increases growth of Brazilian Cerrado grasses. ECOLOGY AND EVOLUTION 10: 6364–6372, 2020a

LEITE MR, CASSIOLATO AMR, **LANNES LS**. *Urochloa decumbens* has higher mycorrhizal colonization in degraded than in pristine areas in the Brazilian Cerrado. FLORAM 26: 1–7, 2019

LANNES LS, KARRER S, TEODORO D, BUSTAMANTE MMC, EDWARDS PJ, OLDE VENTERINK H. Species richness both impedes and promotes alien plant invasions in the Brazilian Cerrado. SCIENTIFIC REPORTS 10: 11365, 2020b

BORER E, HARPOLE WS, ADLER PB, ARNILLAS CA, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, CAMPANA S, DICKMAN CR, DICKSON TL, DONOHUE I, ESKELINEN A, FIRN JL, GRAFF P, GRUNER DS, HECKMAN RW, KOLTZ AM, KOMATSU KJ, **LANNES LS**, MACDOUGALL AS, MARTINA JP, MOORE JL, MORTENSEN B, OCHOA-HUESO R, OLDE VENTERINK H, POWER SA, PRICE JN, RISCH AC, SANKARAN M, SCHUTZ M, SITTERS J, STEVENS CJ, VIRTANEN R, WILFAHRT PA, SEABLOOM EW Nutrients cause grassland biomass to outpace herbivory. NATURE COMMUNICATIONS 11: 6036, 2020

PRICE JN, SITTERS J, OHLERT T, TOGNETTI P, BROWN CS, SEABLOOM EW, BORER E, PROBER SM, BAKKER ES, MACDOUGALL A, YAHDJIAN L, GRUNER DS, OLDE VENTERINK H, BARRIO IC, GRAFF P, BAGCHI S, ARNILLAS CA, BAKKER JD, BLUMENTHAL DM, BOUGHTON EH, BRUDVIG LA, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, DICKMAN CR, DONOHUE I, GRÉGORY S, HAUTIER Y, JÓNSDÓTTIR IS, **LANNES LS**, MCCULLEY LR, MOORE, JL, POWER SA, RISCH AC, SCHUTZ M, STANDISH R, STEVENS CJ, VEEN GF, VIRTANEN R, WARDLE GM. Evolutionary history of grazing and resources determine herbivore exclusion effects on plant diversity. NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION 7: 1–9, 2022

ESKELINEN A, JESSEN M-T, BAHAMONDE HA, BAKKER JD, BORER E, CALDEIRA MC, HARPOLE W, JIA M, **LANNES LS**, NOGUEIRA C, OLDE VENTERINK H, PERI P, PORATH-KRAUSE, A, SEABLOOM EW, SCHROEDER K, TOGNETTI P, YASUI SLE, VIRTANEN R, SULLIVAN LL. Herbivory and nutrients shape grassland soil seed banks. NATURE COMMUNICATIONS 14: 3949, 2023

MACDOUGALL A, ESCH E, CARROLL O, BONNER C, OHLERT T, SIEWART M, SCHWEIGER A, SULIK J, BORER E, NAIDU D, BAGCHI S, HAUTIER H, WILFAHRT P, LARSON K, OLOFSSON J, CLELAND E, MUTHURKRISHNAN R, O´HALLORAN L, ALBERTI J, ANDERSON TM, ARNILLAS CA, BAKKER JD, BARRIO IC, BIEDERMAN L, BOUGHTON

EH, BRUDVIG L, BRUSCHETTI M, BUCKLEY Y, BUGALHO MN, CADOTTE MW, CALDEIRA MC, CATFORD JA, D'ANTONIO C, DAVIER K, DALEO P, DICKMAN CR, DONOHUE I, ELGERSMA K, EISENHAUER N, ESKELINEN A, ESTRADA C, FAY PA, FEND Y, GRUNER DS, HAGENAH N, HAIDER S, HARPOLE S, HERSCH-GREEN E, JENTSCH A, KIRKMAN K, KNOPS JMH, LAANISTO L, **LANNES LS**, LAUNGANI R, LKHAGVA A, MACEK P, MARTINA JP, MCCULLEY R, MELBOURNE B, MITCHELL R, MOORE JL, MORGAN JW, MURAINA TO, NIU Y, PARTEL M, PERI PL, POWER SA, PRICE JN, PROBER SM, REN Z, RISCH AC, SMITH N, SONNIER G, STANDISH RJ, STEVENS CJ, TEDDER M, TOGNETTI P, VEEN C, VIRTANEN R, WARDLE GM, WARING E, WOLF AA, YAHDJIAN L, SEABLOOM E. Widening global variability in grassland biomass since 1980s. Aceito pela NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION em 25/06/2024

FERREIRA L, **LANNES LS,** FIGUEIREDO PAM, FARIA GA, TEIXEIRA MM, GASPARETO RN. Efeitos combinados do fósforo e análogo de brassinoesteroides na fase inicial da cana-de-açúcar: crescimento e fotossíntese. REVISTA IBERO-AMERICANA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS 12: 517–529, 2021

LOPES E SILVA L, MALTONI KL, ANDRADE JAC, **LANNES LS**. Potential of root acid phosphatase activity to reduce phosphorus fertilization in maize cultivated in Brazil. PLOS ONE 18: e029254, 2023

COTRIM GS, GRACA JP, SILVA DM, OLIVEIRA JUNIOR A, CASTRO C, **LANNES LS**, ZOCOLO GJ, HOFFMANN-CAMPO CB. *Glycine max* (L.) Merr. (Soybean) metabolome responses to potassium availability. PHYTOCHEMISTRY 205: 113472, 2023

CARROLL O, BORER E, SEABLOOM E, HARPOLE WS, WILFAHRT P, ARNILLAS CA, BAKKER J, BLUMENTHAL D, BOUGHTON E, BUGALHO MN, CALDEIRA M, CAMPBELL M, CATFORD J, CHEN Q, DICKMAN C, DONAHUE I, DUPRE ME, ESKELINEN A, ESTRADA

C, FAY PA, FRASER E, HAGENAH N, HAUTIER Y, HIRSH-GREEN E, JÓNSDÓTTIR IS, KADOYA T, KOMATSU K, **LANNES LS,** LIANG M, MCCULLEY R, OLDE VENTERINK H, PERI P, POWER S, PRICE J, REN Z, RISCH AC, SONNIER G, VEEN C, VIRTANEN R, WARDLE G, WHEELER G, YAHDJIAN L, MACDOUGALL AS. Nutrient limitation and the prospects for precision fertilization. Em revisão na NATURE SUSTAINABILITY