

# FITÓLITOS – UMA FERRAMENTA PARA ESTUDOS DE RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL – CONCEITOS E REVISÃO SOBRE APLICAÇÕES NO BRASIL

Marcia Regina CALEGARI

Erica de SOUZA

Jonathan Harrison MOZER

Luciane MARCOLIN

Christiane Farias da FONSECA

## RESUMO

Os fitólitos são estruturas microscópicas de sílica ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) produzidos nos tecidos vegetais. O interesse pelo estudo dos fitólitos tem crescido significativamente nos últimos anos no Brasil e no mundo devido a sua grande variedade de usos, desde a arqueologia até a medicina legal e por sua natureza altamente interdisciplinar. A análise fitolítica recentemente tem sido entendida como uma superdisciplina, que perpassa por diferentes escalas de análise. Estudos referentes a produção de fitólitos, variações de forma e tamanho e, a análise/interpretação de assembleias preservadas em solos e sedimentos têm contribuído para a compreensão de questões paleoambientais e paleoarqueobotânicas. Com vistas a relevância e visibilidade que a análise de fitólitos tem apresentado, sobretudo no Brasil, se apresenta aqui uma revisão sobre os principais aspectos relacionados a essa técnica e as aplicações no Brasil.

*Palavras-chave:* Biomineralizações; Opala biogênica; Proxy biológico.

## ABSTRACT

PHYTOLITHS – A TOOL FOR PALEOENVIRONMENTAL RECONSTITUTION STUDIES – CONCEPTS AND REVIEW ON APPLICATIONS IN BRAZIL. Phytoliths are microscopic structures of hydrated silica ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) produced in plant tissues. The interest in studying phytoliths has grown significantly in recent years in Brazil and worldwide due to their wide variety of uses, from archaeology to forensic sciences, and their highly interdisciplinary nature. Phytolith analysis has recently been understood as a superdiscipline, which pervades different levels of analysis. Studies on phytolith production, shape and size diversity, and analysis/interpretation of assemblages preserved in soils and sediments have contributed to understanding paleoenvironmental and paleoarchaeobotanical questions. Considering the relevance and visibility that phytolith analysis has presented, especially in Brazil, a review of the main aspects related to this technique and its applications in Brazil is presented in this study.

*Keywords:* Biomineralization; Biogenic opal; Biologic proxy.

## 1 INTRODUÇÃO

O silício é o segundo elemento mais abundante no planeta (28%), ficando atrás apenas do oxigênio (47%) (EPSTEIN 2001). É um elemento benéfico, importante na nutrição das plantas e

está envolvido em um grande número de aspectos estruturais e dinâmicos dos vegetais (EPSTEIN 1999a, 2001). Na solução do solo, a principal forma é o silício solúvel ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$  - ácido monossilícico), em concentração média de 0,1 a 0,6 mmol  $\text{L}^{-1}$  (EPSTEIN 1999a). No solo, o silício solúvel pode

ser proveniente da decomposição de resíduos vegetais, da aplicação de fertilizantes silicatados ou da transformação de compostos minerais no solo, sendo a principal forma absorvida pelas plantas (WILDING *et al.* 1977, ILLER 1979).

O silício é absorvido pelas plantas através das raízes na forma de ácido monossilícico, transportado por meio do tecido condutor de água (xilema), e depositado entre e dentro das células em vários órgãos das plantas, formando corpúsculos microscópicos, denominados fitólitos (EPSTEIN 2001, PIPERNO 2006).

O interesse pelo estudo dos fitólitos tem crescido significativamente nos últimos anos no Brasil e no mundo. É um tema que se destaca devido sua natureza altamente interdisciplinar, recentemente entendido como uma superdisciplina, que perpassa por diferentes escalas, desde os estudos moleculares envolvidos na formação dos corpúsculos até aqueles que buscam conhecer e compreender o papel dessas biomineralizações em ciclos biogeoquímicos (KATZ 2018, HODSON *et al.* 2020). Os conhecimentos sobre a produção, preservação, identificação e interpretação dos conjuntos de fitólitos, especialmente aqueles de sílica, fluem entre diferentes áreas de conhecimento relacionadas a botânica, ecologia, química, engenharia de matérias, ecossistemas, geociências, etc. (KATZ 2018), reforçando seu caráter multi e transdisciplinar.

Estudos relacionados à produção, variações de forma e tamanho e, a análise/interpretação de assembleias de fitólitos preservadas em solos e sedimentos, têm contribuído para a compreensão das variações paleoambientais, principalmente, ao longo do Período Quaternário, e de uso e ocupação da terra em diversas partes do mundo. No Brasil, de acordo com dados do banco de teses da CAPES o emprego dos fitólitos tem se destacado como ferramenta em estudos de reconstituição paleoambiental e como linha de pesquisa, sobretudo, nas Ciências Humanas e Exatas e da Terra, sendo empregada em estudos paleogeográficos, paleoetnobotânico, paleobotânicos, paleoambientais e pedológicos (gênese de solos) (Figura 1). Isto porque, como marcador ambiental, ele se destaca por apresentar alta durabilidade e grau de conservação em diferentes tipos de solos e condições edáficas, resistirem ao fogo (incêndios) e ao hidromorfismo; morfologia e alta produção, que permitem identificar e classificar as plantas produtoras em nível de família, subfamília e, as vezes em nível de espécie, ademais de permitir identificar a estrutura e tipo de vegetação

(fitofisionomias) e tipos de uso de plantas (dietas, agricultura etc.) (PEARSALL 2016).

Uma sólida reconstituição da (paleo)vegetação é essencial para compreender as trajetórias históricas das mudanças climáticas, e a natureza e extensão do impacto antrópico sobre os ecossistemas. O crescente emprego da análise fitolítica tem se beneficiado da rápida expansão dos trabalhos sobre o comportamento de sílica em plantas vivas e no ambiente, fornecendo a base necessária para a interpretação da assembleia fitolítica preservada em sedimentos, solos e paleossolos (STRÖMBERG *et al.* 2018). Em geral, a análise fitolítica é empregada em complementação aos estudos palinomórficos e isotópicos em solos e sedimentos (FREDLUND & TIESZEN 1994). Entretanto, existem situações em que o fitólito é o único marcador biológico que pode ser usado, assinalando sua relevância. Comparado com outros *proxie*, como pólen e isótopos, os fitólitos oferecem vantagens e desvantagens. Como vantagens destacam-se: a) durabilidade e boa conservação nos solos; b) características morfológicas que permitem diferenciação entre famílias, subfamílias e *táxon*; c) alta produção permitindo comparação com espécies vivas e identificação; d) aplicação a diversos tipos de restos arqueológicos e ambientes. Como desvantagens avulta-se: a) não são produzidos em todas as plantas, variando taxonomias com produção baixa ou nula; b) redundância (produção de um mesmo morfotipo característico em diversos *taxa*); c) multiplicidade (produção de vários morfotipos diferentes no mesmo *táxon*) (ALBERT 1995).

Como *proxy* os fitólitos permitem identificar e caracterizar comunidades de vegetação, em nível de família, modernas e, sobretudo, pretéritas preservadas em solos e sedimentos, bem como definir a espacialização das comunidades vegetais e sua temporalidade. Também podem ser empregados como *proxy* pedológico e sedimentológico, uma vez ao compreendermos seu estágio de preservação e ciclos de deposição podemos compreender as variações físico-químicas que o solo/sedimento vivenciou desde a incorporação dos fitólitos na sua matriz mineral. HYLAND *et al.* (2013) destacam que nem todos os tipos de solos são adequados para a preservação de fitólitos. Por isso, para uma boa análise fitolítica, sobretudo quando empregada para reconstituição paleoambiental, conhecer as propriedades e características dos solos, os fatores e processos atuantes ao longo do tempo é tão importante quanto conhecer as características fisiológicas e ecológicas das plantas produtoras de fitólitos.

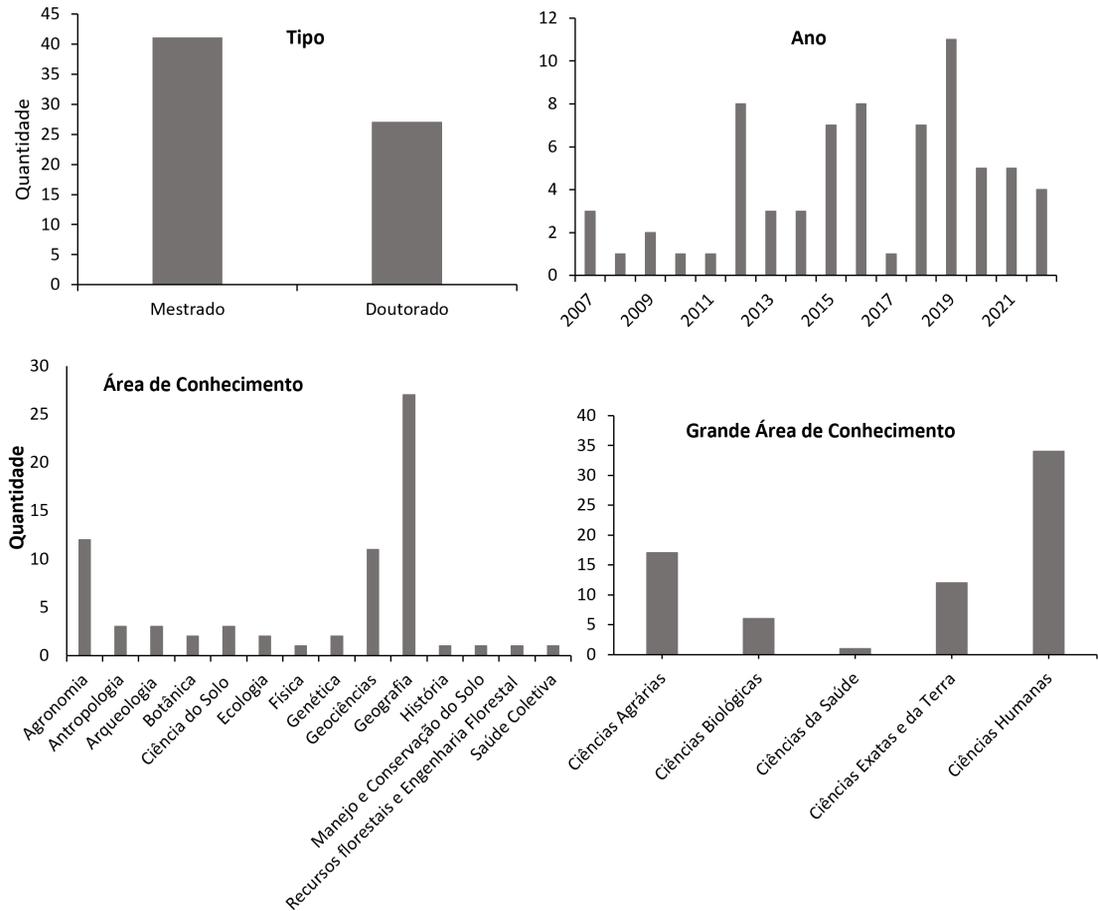


FIGURA 1 – Evolução dos estudos com fitólitos em teses e dissertações no Brasil. Fonte: Banco de teses da CAPES (Entre 2007 e 2022).

FIGURE 1 – Evolution of studies with phytoliths in theses and dissertations in Brazil. Source: CAPES theses bank (Between 2007 and 2022).

Com vistas a relevância e visibilidade que a análise de fitólitos tem apresentado, propõe-se aqui uma revisão sobre os principais aspectos relacionados ao estudo, uso e aplicação dos fitólitos. Também se destaca os estudos realizados no Brasil. Há de se deixar claro que esta revisão não tem a pretensão de esgotar o tema. Ela foi elaborada da maneira mais abrangente possível, pensando naqueles que estão iniciando sua incursão pelo “maravilhoso mundo dos fitólitos”.

#### Conceitos e definições

Fitólito (do grego *Φύτον*, planta + *λίθος*, pedra) significa “pedra produzida por plantas”. Este termo foi inicialmente proposto por Ruprecht em 1866, para referir-se as biomineralizações produzidas pelas plantas. Biomermineralizações são substâncias amorfas ao raio-x (COSTA *et al.* 2019), geradas

pelo funcionamento metabólico de organismos vivos, em suas funções fisiológicas específicas vitais e remetem ao código genético desses organismos (KNOLL 2003). As biomineralizações são encontradas em todos os níveis da biosfera, nos cinco reinos e podem ser compostas de cálcio, ferro, manganês, magnésio e sílica (KNOLL 2003).

As biomineralizações têm sido observadas em quase todos os tipos de tecidos vegetais e em todos os cladós de plantas vivas em maior ou menor quantidade (MULHOLLAND & RAPP 1992, STRÖMBERG *et al.* 2018), sejam como preenchimento de células individuais ou como seções de tecidos totalmente silicificados, constituindo até 10% do peso da massa seca da planta (TREMBATH-REICHERT *et al.* 2015, RASHID *et al.* 2019). As biomineralizações resultam na formação de corpúsculos microscópicos com forma reconhecíveis

constituindo um sistema de identificação morfológica de “moldes de opala”.

Os fitólitos, de acordo com sua composição, sílica ou oxalato de cálcio, são denominados, respectivamente, silicofitólitos e calcofitólitos (ALBERT 1995). Eles apresentam significativas diferenças em sua estrutura e atributos taxonômicos. Devido a sua natureza e propriedades os silicofitólitos, doravante denominado fitólitos, se destacam como um *proxy* biológico e ambiental. Vários sinônimos são empregados para defini-los, por exemplo, opala biogênica, opala vegetal, opala de sílica inorgânica, biólitos, pedra planta, corpos silicosos encontrado em plantas, opala fitolítica, opala da planta, sílica opalina, opala, opala herbácea ou sílica biogênica, na madeira são chamados também de grãos de sílica (WILDING *et al.* 1977, MULHOLLAND & RAPP 1992, PIPERNO 2006).

Os precursores no estudo dos fitólitos foram Loeuwenhoek, que observou biomineralização de cálcio em 1675 e Ehrenberg, que iniciou a sistematização da descrição dos morfotipos de corpúsculos de sílica em 1836 (MULHOLLAND & RAPP 1992). Após eles, vários outros autores foram moldando o conceito de fitólitos, inclusive RUPRECHT (1866).

## 2 ASSEMBLEIA DE FITÓLITOS

O uso dos fitólitos como *proxy* é baseado no conjunto de morfotipos produzidos pelas plantas e aqueles incorporados ao solo, considerado assembleia fóssil por alguns autores (PEARSALL 1982). Entretanto, a análise fitolítica requer um entendimento dos atributos morfológicos, químicos e físicos dos corpúsculos de sílica, assim como o entendimento das suas relações com o solo/sedimento em que se encontram estocados (HART & HUMPHREYS 1997, 2003; HUMPHREYS *et al.* 2003; JOUQUET *et al.* 2020).

Uma assembleia fitolítica é composta pelo conjunto de morfotipos de biomineralizações de sílica produzidos por uma planta (coleções de referência) e aquele armazenado no solo. A composição da assembleia fitolítica em solos e sedimentos está relacionada a mobilidade e estabilidade dos morfotipos quando expostos a pedogênese e a bio-turbação no solo (PEARSALL 1989).

A assembleia preservada no solo/sedimento é o produto da função que envolve quatro fatores (*Assembleia de fitólitos no solo* =  $f\{P,D,R,I\}$ ), sendo eles: *produção de fitólitos* (P) - nem todas as plantas produzem fitólitos na mesma propor-

ção (PIPERNO 2006, STROMBERG *et al.* 2016, GAO *et al.* 2018); *dispersão* (D) - morfotipos maiores tendem a se deslocar em distâncias curtas e são mais frágeis no ambiente (CALEGARI *et al.* 2017a); *preservação* (R) - resistência dos corpúsculos de sílica aos processos de oxi-redução, dissolução e translocação que ocorrem no interior do solo; a sílica pode se dissolver pela oscilação do lençol freático e do pH e, ser translocada pela percolação e pela atividade biológica (ALEXANDRE & MEUNIER 1997, HART 2003, RODRIGUES 2019); e *identificação* (I) - a produção intra e entre famílias é diversificada e, por vezes, redundante e múltipla (ROVNER 1971), sendo ainda preciso considerar que muitas plantas não são produtoras de fitólitos. Neste sentido, além de estudos voltados para o conhecimento da produção de fitólitos (coleções de referência de fitólitos modernos), também são muito importantes aqueles dedicados ao ambiente de preservação dos fitólitos.

STRÖMBERG (2009) destaca que em uma análise quantitativa baseada na assembleia de fitólitos, o erro casual associado à contagem insuficiente na fase de identificação pode afetar a robustez da interpretação, seja na reconstituição da vegetação ou na diferenciação taxonômica dos morfotipos. Em estudos de coleção de referência, para obter um conjunto de fitólitos representativo morfológica e estatisticamente, a assembleia deve ser composta por no mínimo 300 morfotipos diagnósticos (STRÖMBERG 2009, ZURRO 2018.), isto é, fitólitos identificados e com paridade taxonômica. Para os estudos de reconstituição sugere-se que sejam considerados no mínimo 200 morfotipos diagnósticos (STRÖMBERG 2009). Essas recomendações têm sido adotadas pela grande maioria dos pesquisadores.

### 2.1 Produção de fitólitos

Os fitólitos são corpos micrométricos de opala hidratada formados nos tecidos vegetais ao logo da vida das plantas (STRÖMBERG *et al.* 2018). O processo de silicificação depende de vários fatores genéticos e ambientais, tais como o clima, o ambiente onde a planta cresce e se desenvolve, a disponibilidade de água no solo, bem como características específicas das plantas como idade e afinidade taxonômica (ILER 1979).

Os fitólitos são produzidos por meio da polimerização do ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) que é absorvido pelas plantas através das raízes e transportado pelo sistema vascular. São resultantes de processos biológicos e físicos em certos grupos de

plantas. Parte do silício que as plantas absorvem do soluto do solo é utilizada para os processos metabólicos e a parte não utilizada é depositada no lúmen da célula, no espaço intercelular e/ou na parede celular (EPSTEIN 2001, 2009; PIPERNO 2006; HE *et al.* 2013). Antes que a água seja eliminada da planta por evapotranspiração a sílica é depositada em forma de gel nesses locais e com o decorrer do tempo, é solidificada. O transporte e o acúmulo de silício nas plantas podem ser regulados por um processo ativo, que normalmente é desencadeado pelo estímulo à proteção contra doenças, pragas e outras condições de estresse, sugerindo que o acúmulo de silício na forma de  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  depende das exigências das plantas para resistirem a uma condição de estresse (OLIVEIRA 2009)

OLIVEIRA (2009) em revisão sobre o tema destacou que o processo de absorção do ácido monossilícico, que possui carga neutra, ocorre pela membrana das células epidérmicas, de um local de alta concentração para baixa concentração, pela dissolução através da membrana. Como a membrana hidrofóbica não permite entrada de água e conseqüente carregamento do soluto, a passagem do ácido monossilícico para dentro da célula da raiz pode ocorrer por difusão ativa ou por canais de entrada de água, sobretudo em espécies das famílias de Poaceae, Cyperaceae e até mesmo para o gênero *Phaseolus* (Fabaceae) (RAVEN 2001, OLIVEIRA 2009). Essas famílias são conhecidas pela sua alta produção de fitólitos (TWISS 1992, HONAINÉ *et al.* 2009).

Conforme STRÖMBERG *et al.* (2018) os dados de sílica atualmente publicados ainda são insuficientes para determinar a produção em plantas terrestres não vasculares como as briófitas. Por outro lado, a afinidade das monocotiledôneas pela sílica é bem conhecida (MA 2003), em especial as gramíneas, que acumulam mais sílica e chegam a produzir cerca de 20% mais fitólitos dos que as não monocotiledôneas (WILDING & DREES 1971, ALBERT *et al.* 2009).

Os fitólitos de sílica são compostos de sílica hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e assim como os minerais silicatos (quartzo, cristobalita e tridimita), invariavelmente, podem conter impurezas que aumentam em magnitude, do quartzo para a opala, devido ao aumento da microporosidade (WILDING *et al.* 1977). Em revisão sobre o tema esses autores destacam que a composição das opalas biogênicas é principalmente de  $\text{SiO}_2$  (85% a 95%) e pode conter quantidades significativas de impurezas oclusas, adsorvidas quimicamente ou em soluções sólidas

de Al, Fe, Ti, Mn, P, Cu, N, C, alcalinas e terras alcalinas (WILDING *et al.* 1977, EPSTEIN 1999b)

As dimensões dos fitólitos de sílica variam entre  $2 \mu\text{m}$  e  $1.000 \mu\text{m}$ , com maior ocorrência entre  $20 \mu\text{m}$  e  $200 \mu\text{m}$ . Possuem peso específico que varia entre  $1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  e  $2,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  e se destacam dos minerais cristalinos por apresentarem índice de refração de 1,458 (WILDING *et al.* 1977, DREES *et al.* 1989). Em luz transmitida normalmente, apresentam-se translúcidos com cor bruno-amarelada a rosada.

Os fitólitos são produzidos em várias partes da planta, principalmente nas folhas e raízes de plantas herbáceas e lenhosas e na madeira de árvores e arbustos. No tecido epidérmico das folhas e no colmo de herbáceas existem maiores perdas de água e, portanto, as mais altas taxas de silicificação e produção de fitólitos (WILDING *et al.* 1977). No entanto, a produção de fitólitos não ocorre de maneira homogênea em todas as plantas, havendo, portanto, a distinção entre as plantas consideradas baixas ou altas produtoras e aquelas que não produzem fitólitos, as não silicificadoras. Exemplo de espécie não silicificadora é a *Ricinus communis* (Euphorbiaceae), que possui processos preferenciais de eliminação do ácido monossilícico (HORN *et al.* 2014).

Em termos de quantidade e diversidade/variedade de produção, e o grau de desenvolvimento dos diferentes tipos de fitólitos, sabe-se que é bastante variado, pois a quantidade de silício varia muito entre as espécies de plantas, até mesmo entre as subespécies (EPSTEIN 1999a, b; 2001, 2009). Esta variação é uma das maiores entre os elementos presente nas plantas; provavelmente porque algumas exigem mais silício (como elemento necessário/indispensável) para o metabolismo primário do que outras (HODSON *et al.* 2005, EPSTEIN 2009).

## 2.2 Identificação

Conhecer quais os morfotipos diagnósticos e em quais partes de cada planta eles são produzidos é tão importante quanto saber quais são as plantas que produzem fitólitos. Isto porque a produção intra e entre familiar é muito variada (STRÖMBERG *et al.* 2018).

Por assumirem a forma das células em torno das quais a sílica foi depositada, os fitólitos representam aspectos variáveis da anatomia vegetal preservada (ICPT *et al.* 2019). Alguns morfotipos, especialmente os de estruturas reprodutivas, podem ser específicos para certos grupos taxonômicos e

de fácil identificação. Entretanto, na maior parte da produção observa-se repetições de formas (morfotipos). ROVNER (1971) destaca que essa repetição na produção de alguns morfotipos pode ser classificada como múltipla e redundante. Múltipla devido a mesma planta produzir, em suas diferentes partes, vários morfotipos diferentes, e redundante porque uma mesma forma pode ser produzida por diferentes plantas de diferentes famílias, gêneros ou espécies, gerando ruídos na identificação dos grupos taxonômicos. Esses fenômenos, quando não compreendidos tornam as identificações botânicas baseadas na análise de fitólitos, uma questão, no mínimo, complexa (ROVNER 1971, VRYDAGHS *et al.* 2016).

Inúmeras angiospermas, gimnospermas e pteridófitas produzem grande quantidade de fitólitos (STRÖMBERG *et al.* 2018). Os fitólitos podem ser produzidos em muitos órgãos e tecidos vegetais, como folhas, brácteas de inflorescência, frutos, sementes, colmos, troncos, tecidos lenhosos e raízes (MULHOLLAND & RAPP 1992; EPSTEIN 1999a, 2001; STRÖMBERG *et al.* 2018; VRYDAGHS *et al.* 2016). Com base nos estudos disponíveis a produção entre as famílias tem sido dividida em grupos de alta, moderada e baixa produção (PIPERNO 2006).

Os fitólitos apresentam grande potencial para acompanhar a história evolutiva e paleoecologia das plantas, em especial das gramíneas (Poaceae) (STRÖMBERG 2002). O conhecimento atual sugere que os fitólitos estão restritos a plantas vasculares, com alto nível de produção e formas específicas em pteridófitas (samambaias e cavalinhas), angiospermas basais (magnólias), monocotiledônea (particularmente gramíneas e juncos) e em dicotiledôneas (SHARMA *et al.* 2019) (Figura 2).

O crescente aumento de coleções de referências de fitólitos produzidos em plantas atuais, com dados sobre morfologia, morfometria e produção intra e entre espécies (por exemplo, RUNGE 1999, CARNELLI *et al.* 2001, SUNDUE 2009, RAITZ 2012, RICARDO *et al.* 2018, MERCADER *et al.* 2019, SOUZA 2019, MOZER 2021) têm permitido contribuir significativamente no conhecimento da acumulação de sílica e produção de fitólitos entre os diferentes *taxa* em vários níveis de hierarquia de plantas vasculares.

Os estudos sobre produção e identificação de morfotipos são imperativos para minimizar os ruídos da multiplicidade e da redundância nas análises. A multiplicidade e a redundância são muito comuns na família Poaceae e em outros

*taxa* que também apresentam idioblastos. Ainda que o conjunto de fitólitos produzidos por certos *taxa* sejam já aceitos por apresentarem formas únicas com significado taxonômico em nível de subfamília, ainda há pontos incertos, como por exemplo a produção de variações nos BILOBATES (NEUMANN *et al.* 2017), assim como o morfotipo RONDEL (PIPERNO 1988, 2006; MULHOLLAND 1989), levando à complexidade e, às vezes, a sobreposição substancial em conjuntos de células curtas de gramíneas (RONDEL, BILOBATE, CROSS, SADDLE e POLYLOBATE) produzidos por diferentes espécies de Poaceae.

A sobreposição de morfotipos entre os *taxa* têm sido objeto de estudos que visam melhorar os métodos de identificação dos morfotipos, que na maioria das vezes é feito considerando a forma em 2D, empregando técnicas computacionais para identificação automatizada (DÍEZ-PASTOR *et al.* 2020) ou, pelo menos enfocando a necessidade de identificação/representação em visão 3D (GALLAHER *et al.* 2020), para aumentar o nível de informações sobre os morfotipos e assim, obter uma resolução taxonômica muito melhor.

No Brasil vários estudos foram realizados para conhecimento da produção de fitólitos nos diferentes biomas, sobretudo os tropicais. Muitos desses estudos são trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado (por exemplo, CECCHET 2012, FELIPE 2012, RAITZ 2012, MACEDO 2013, BRUSTOLIN 2015, MACEDO *et al.* 2015, KAMMER 2018, RICARDO *et al.* 2018, SOUZA 2019, STEVANATO *et al.* 2019, SANTOS & CALEGARI 2020, MOZER 2021), cuja publicação dos resultados ainda se encontra em andamento.

A maioria dos estudos supracitados tem se preocupado também em conhecer os morfotipos armazenados na serrapilheira. A serrapilheira é composta por restos de plantas que ao final do ciclo vegetativo das plantas, quando elas ou uma parte delas morrem, liberam materiais que ficam armazenados na superfície do solo. O material da serrapilheira se decompõe e libera os fitólitos dos tecidos que podem ser incorporados ao solo e em sedimentos (processo de dispersão) e, assim, serem usados na reconstrução de ambientes e atividades pretéritas. Desta forma, o solo passa a ser um importante reservatório de fitólitos, que registra parte da história do ambiente, dos processos e acontecimentos ambientais ocorridas ao longo do tempo (JANZEN 2016).

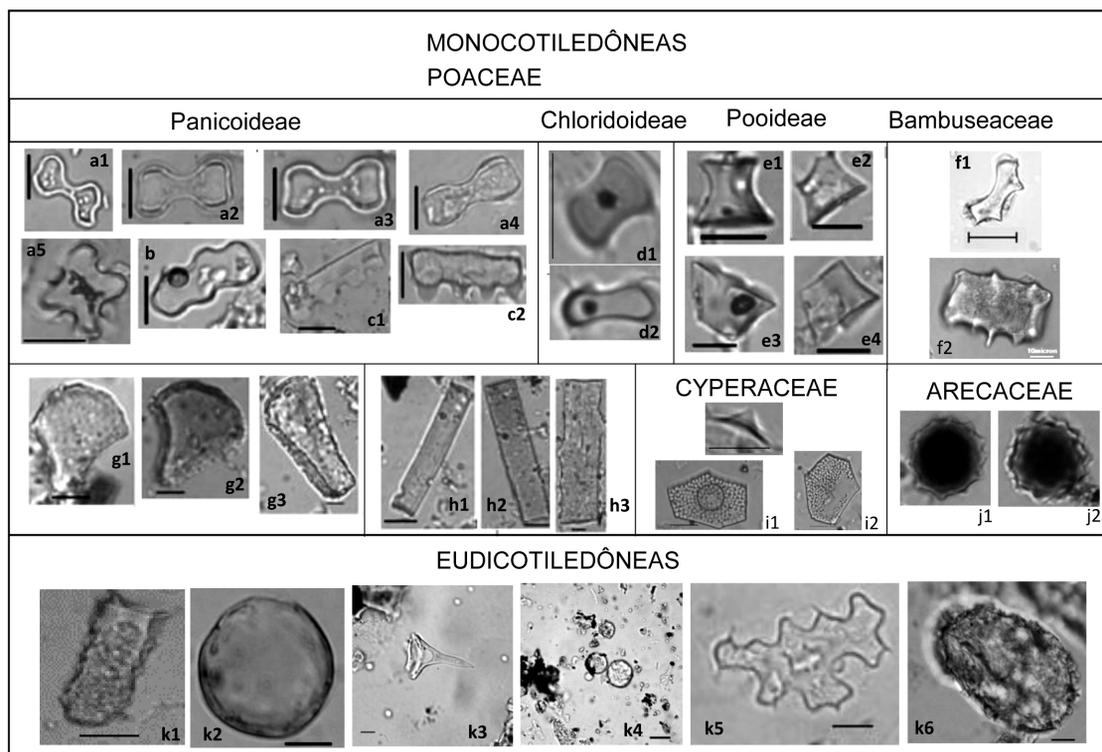


FIGURA 2 – Morfotipos diagnósticos. Monocotiledôneas - Poaceae: a) BILOBATE, b) CROSS, c) TRAPEZIFORM SINUATE, (subfamília Panicoideae) d) SADDLE (subfamília Chloridoideae), e) RONDEL (subfamília Pooideae), f1) SADDLE COLAPSED, f2) BLOCK SINUATE/ECHINATE (subfamília Bambuseaceae), g) BULLIFORM FLABELLATE, h) ELONGATE (todas as Poaceae); Cyperaceae: I) CONICAL; Arecaceae: j) SPHEROID ECHINATE. Eudicotiledôneas: k1) PRISMATIC POLYGONAL com SUBCONICAL TOP (*Commelina sp*), k2) SPHEROID PSILATE, k3) ACUTE BULBOUS, k4) SPHEROID PSILATE SMALL, k5) POLYGONAL PLATELETS, k6) ELIPSOIDAL ORNATE. Escala = 10 µm.

FIGURE 2 – Diagnostic morphotypes. Monocots - Poaceae: a) BILOBATE, b) CROSS, c) TRAPEZIFORM SINUATE, (subfamily Panicoideae) d) SADDLE (subfamily Chloridoideae), e) RONDEL (subfamily Pooideae), f1) SADDLE COLAPSED, f2) BLOCK SINUATE/ECHINATE (subfamily Bambuseaceae), g) BULLIFORM FLABELLATE, h) ELONGATE (all Poaceae); Cyperaceae: I) CONICAL; Arecaceae: j) SPHEROID ECHINATE; Eudicots: k1) PRISMATIC POLYGONAL WITH SUBCONICAL TOP (*Commelina sp*), k2) SPHEROID PSILATE, k3) ACUTE BULBOUS, k4) SPHEROID PSILATE SMALL, k5) POLYGONAL PLATELETS, k6) ELIPSOIDAL ORNATE. Escala = 10 µm.

### 2.3 Dispersão

Após a morte e decomposição do tecido vegetal os fitólitos são liberados e incorporados ao solo. Em geral, os fitólitos são mais abundantes em quantidade e variedades na serapilheira no horizonte superficial do solo e diminuem em profundidade como resultado de processos de mistura no perfil (ALEXANDRE & MEUNIER 1997).

A liberação dos fitólitos do material da serapilheira é devido à dissolução, quebra mecânica e abrasão e à atividade biológica atuando nos tecidos vegetais (PIPERNO 1988, RUNGE 1999), sobre-

tudo em zonas tropicais (HART & HUMPHREYS 1997). Estas ações permitem que as partículas de sílica biogênica liberadas possam ser incorporadas ao solo.

Os fitólitos, propriamente ditos, não tendem a se mover para camadas inferiores do solo, essa percolação é acometida por processos pedogenéticos onde eles estão inseridos (ALEXANDRE & MEUNIER 1997, PIPERNO 2006, STRÖMBERG *et al.* 2018, RASHID *et al.* 2019).

Por possuírem dimensões que variam entre aquelas das frações silte (0,053 – 0,002 mm) e argila (< 0,002mm), os fitólitos igualmente

podem ser transportados para o interior do solo, em profundidade, pelos animais e pela água através dos canais (BOETTINGER 1994; HART & HUMPHREYS 1997; FISHKIS *et al.* 2009, 2010), assim como para as camadas superficiais, pela macrofauna do solo, e para os montes acima e dentro do solo, como exemplo os cupinzeiros e formigueiros (HARDT 2003, COSTA *et al.* 2019, JOUQUET *et al.* 2020).

#### 2.4 Preservação

O termo *tafonomia* deriva do grego (*tafos*= sepultamento, *nomos*= leis) e trata das leis envolvidas na transição dos restos orgânicos da biosfera para a litosfera (EFREMOV 1940). Estudos de ordem tafonômica têm como objetivo entender como os processos de fossilização atuaram, com perspectiva mineralógica/geológica ou arqueológica. As diferentes formas de tafonomia pré e pós-deposição podem afetar as assembleias de fitólitos incorporadas aos sedimentos e solos e, estes processos podem ser naturais e/ou induzidos pelos humanos (MADELLA & LANCELOTTI 2012).

Vários autores consideraram os processos tafonômicos em seus estudos, entre eles ALBERT *et al.* (2006), OSTERRIETH *et al.* (2009), MADELLA & LANCELOTTI (2012), CALEGARI *et al.* (2013), GARNIER *et al.* (2013), CABANES & SHAHACK-GROSS (2015) e RODRIGUES (2019). O entendimento dessas questões é essencial, pois há um interesse crescente em analisar os fitólitos em conjunto com outros *proxies* (por exemplo, pólen, diatomáceas, espículas de esponja, isótopos de carbono e nitrogênio), o que faz com que os pesquisadores não só reduzam as incertezas nas reconstituições paleopaisagísticas, mas também permitam a verificação cruzada de metodologias e resultados (RASHID *et al.* 2019).

Embora suscetíveis à dissolução em condições de pH extremos, quando em condições normais (pH entre 4,0 e 8,0) os fitólitos podem permanecer por longos períodos no solo (JENKINS 2009). Assim como as partículas minerais do solo, eles também são passíveis de erosão, translocação e transporte por agentes como vento, água e animais a curtas distâncias (LUTWICK & JOHNSTON 1969, THORN 2007).

A preservação dos fitólitos varia conforme o tipo de célula e o ambiente de depósito. HYLAND *et al.* (2013) destacam que algumas Ordens de solo são menos favoráveis a preservação dos fitólitos. Entretanto, no Brasil os fitólitos têm sido encontrados em diversos tipos de solos, em grande quanti-

dade e diversidade: Latossolos (CALEGARI 2008, CALEGARI *et al.* 2013, MARQUES, 2019, SOUZA, 2019, CALEGARI & VIDAL-TORRADO 2020), Espodossolo (SILVA NETO *et al.* 2018), Organossolos (SILVA NETO *et al.* 2019), Antropossolos (Terra Preta de Índio ou Terra Arqueológica, MACEDO 2013; Sambaqui, CALEGARI & VIDAL-TORRADO 2020; MACHADO *et al.* 2022), Argissolos (CECCHET 2015, CALEGARI *et al.* 2017b, CHIAPINI *et al.* 2018), e Cambissolos (CALEGARI *et al.* 2017b); Planossolos e Plintossolos (CALEGARI & VIDAL-TORRADO 2020). Os solos com abundância de óxidos de ferro e alumínio, como os Latossolos Vermelhos, comuns em regiões tropicais, têm se mostrado particularmente favoráveis à preservação de fitólitos (PIPERNO 2006, CALEGARI 2008;). Em solos não hidromórficos, os grãos de pólen podem ser escassos ou ausentes devido às condições oxidantes do ambiente que podem destruí-los ou danificá-los, tornando inviável o uso da análise polínica, enquanto os fitólitos se preservam bem, tanto em condições hidromórficas, quanto oxídicas (DRESS *et al.* 1989).

Embora a ferralitização (processo de remoção de sílica do solo) e ferrólise (destruição de argilominerais do horizonte superficial do solo por oxidação do ferro) sejam processos atuante nos solos tropicais (KÄMPF & CURI 2012), não se tem observado ataque significativo aos fitólitos, sendo possível recuperar assembleias com grande quantidade e variedade de fitólitos nos estudos realizados em solos brasileiros (CALEGARI *et al.* 2013, MACEDO 2013, COE *et al.* 2014, SILVA NETO *et al.* 2018, MACHADO *et al.* 2021, LISTO *et al.* 2022). A microagregação, comum em solos tropicais, aprisiona fitólitos no interior dos microagregados e, de acordo com LI *et al.* (2020), protege os morfotipos dos processos pedogenéticos mais agressivos, a ponto de não se observar sinais de dissolução nos fitólitos recuperados desses agregados.

Em condições de semiaridez, como no nordeste do Brasil, ou aridez, a falta de matéria orgânica no solo pode inviabilizar o uso da análise isotópica de carbono ou nitrogênio. Os fitólitos, por outro lado, se preservam bem nessas condições (RANULPHO 2016, GALVÃO 2019, BARROSO *et al.* 2021, LISTO *et al.* 2022) e ainda separam as gramíneas de ciclo C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, pois permitem a classificação taxonômica das gramíneas em nível de subfamília (TWISS 1992).

Os estudos sobre questões tafonômicas têm sido mais comum fora do Brasil e vários são os trabalhos voltados para a compreensão da movi-

mentação e preservação dos fitólitos no interior do solo (por exemplo, HART & HUMPHREYS 1997, 2003; GRAVE & KEALHOFER 1999; RUNGE 1999; HUMPHREYS *et al.* 2003; OSTERRIETH *et al.* 2009; MADELLA & LANCELOTTI 2012; PEARSALL 2016). Estes trabalhos indicam que nem todos os solos são favoráveis a preservação de fitólitos devido a oxidação ou a aderência de argilas (FREDLUND & TIESZEN 1997, HYLAND *et al.* 2013) e/ou pela bioturbação (COUSINS *et al.* 1999, RUNGE 1999, BUNZL 2002, KASTE *et al.* 2007). As variações na preservação de fitólitos entre os diferentes tipos de solos são esperadas, pois cada tipo de solo é o resultado da combinação de múltiplos fatores e processos que afetam o cálculo dos fatores de correlação, entre eles a conservação das assembleias fitolíticas (PEARSALL 2016).

A granulometria do solo e a circulação da água no perfil interferem na mobilidade dos fitólitos (HART & HUMPHREYS 1997, PEARSALL 2016). Solos de textura arenosa e com elevadas taxas de percolação vertical podem carrear fitólitos pelo processo de eluviação e, em superfície a circulação lateral da água pode retirar os fitólitos, juntamente com as partículas mais finas por meio do processo de elutriação (RODRIGUES 2019). Estudos têm indicado que o tamanho do fitólito interfere na translocação dentro do perfil de solo (LIU *et al.* 2019). Morfotipos menores se movimentam mais e o tipo de solo pode influenciar diretamente no transporte desses fitólitos (FISHKIS *et al.* 2009). O teor de adsorção das frações mais finas do solo, como o silte e a argila, também influencia no transporte do fitólito, uma vez que a capacidade de troca catiônica (CTC) dos sedimentos finos gera adsorção dos fitólitos e estes percolam junto para as camadas inferiores e sofrem os mesmos processos pedogenéticos de transporte (PEARSALL 1989).

O *táxon* também é sugerido como um parâmetro que influencia na preservação do fitólito e afeta a interpretação das assembleias conforme observado por WILDING & DREES (1973), que mostraram que a opala biogênica produzida nas folhas das árvores decíduas é 10 a 15 vezes mais solúvel que a opala produzida pelas gramíneas.

Alguns estudos têm assumido erroneamente que a solubilidade da sílica amorfa aumenta com a elevação do pH de 3 para 8, porém já se tem claro que a solubilidade desta sílica depende da conjugação entre a temperatura, pH e o tamanho da partícula (ILER 1979). Isto é, aumenta linearmente com a temperatura a partir de 0 °C e é independente

do pH quando abaixo de 9, porém aumenta rapidamente quando acima deste valor (WILDING *et al.* 1977). A rápida elevação na solubilidade em pH > 9 é devido a ionização do ácido monossilícico. A solubilidade do quartzo aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, sendo assim, fitólitos menores e com maior área específica são dissolvidos mais rapidamente que os de célula longa, padrão que tem sido assumido para a sílica biogênica também (WILDING *et al.* 1977).

Nos solos a dissolução dos minerais de sílica não é afetada somente pela solubilidade, mas também pelos componentes orgânicos e inorgânicos do solo, recobrimento superficial, e solução/soluto do solo. A dissolução de opala é retardada pelo carbono orgânico ocluso absorvido quimicamente que pode agir como um agente protetor aos morfotipos (WILDING *et al.* 1977). Não apenas a presença de impurezas químicas em contato com o fitólito, bem como a "maturidade" dos fitólitos pode estar relacionada a sua preservação (OSTERRIETH *et al.* 2009). Estudo realizado por CECCHET (2015) demonstrou que a assembleia da base de um perfil de Nitossolo Vermelho Distroférrico típico, cuja idade da matéria orgânica do solo é de 17.952 Anos Cal. AP., apresentou menor quantidade de fitólitos, sendo a maioria com sinais de corrosão.

CABANES & SHAHACK-GROSS (2015) sugeriram que um dos fatores que determina a estabilidade diferencial dos fitólitos, mediante os processos tafonômicos, relaciona-se com a superfície específica e a massa individual dos fitólitos que está intimamente relacionada com o tamanho do morfotipo. Esta compreensão ajuda a avaliar a confiabilidade de certos morfotipos para a reconstrução paleoecológica e arqueológica, alertando que as interpretações obtidas a partir de assembleias de fitólitos pouco preservadas podem representar cenários botânicos distorcidos.

A preservação dos fitólitos também sofre o efeito da bioturbação (MADELLA & LANCELOTTI 2012, PEARSALL 2016). Normalmente a quantidade de fitólitos diminui em profundidade, mas a sua presença no interior de biotúbulos no horizonte B, preenchidos com materiais do horizonte A, indicam a movimentação de fitólitos pela macrofauna do solo, como observado por CALEGARI *et al.* (2013). Entre a macrofauna do solo (invertebrados do solo > 2mm), as minhocas, cupins e formigas desempenham papéis importantes no controle da dinâmica da estrutura do solo (BOTTINELLI *et al.* 2015, SHANBHAG *et al.* 2019) e, conseqüentemente, na distribuição dos fitólitos no interior do solo.

Em contexto tropical são poucos os trabalhos que avaliaram os impactos da bioturbação na distribuição de fitólitos nos perfis de solos (RUNGE 1999, WILKINSON & HUMPHREYS 2005, WILKINSON *et al.* 2009, CALEGARI *et al.* 2013, RODRIGUES 2019). Alguns desses estudos propuseram que a bioperturbação diminui de maneira não linear com a profundidade do solo (WILKINSON & HUMPHREYS 2005, WILKINSON *et al.* 2009), enquanto outros assumem uma taxa de mistura constante com a profundidade (ALEXANDRE *et al.* 1997, COUSINS *et al.* 1999, BUNZL 2002, KASTE *et al.* 2007)

O efeito da bioturbação na assembleia fitolítica em Latossolos no Brasil foi investigado por RODRIGUES (2019). Neste estudo foram considerados solos de diferentes texturas na região de Piracicaba (SP) e técnica de micromorfologia do solo. Foram observadas zonas de bioturbação diferenciadas ao longo dos perfis, que foram correlacionadas a fases de mudanças das condições ambientais. A bioturbação, apesar de muito intensa, nos perfis estudados parece não ter ocasionado alteração significativas nas assembleias fitolíticas a ponto de comprometer as interpretações paleoambientais.

O transporte horizontal dos fitólitos também pode ser condicionado por ação do vento, do homem e do escoamento superficial (PEARSALL 1989). O transporte eólico é bem menor em ambientes florestados em virtude da densidade arbórea que dificulta o deslocamento das partículas, assim, a assembleia de fitólitos do solo corresponde a uma resposta *in situ* da vegetação florestada.

O relevo é outro fator que afeta diretamente no transporte fitolítico, a erosão na vertente e o escoamento superficial transportam fitólitos para ambientes a jusante, o que pode gerar quebras (LIU *et al.* 2019). Em ambientes fluviais há uma ressalva importante para estudos fitolíticos quanto a formação da assembleia preservada nos sedimentos fluviais. Dependendo do tamanho da bacia, os fitólitos podem chegar de vários pontos diferentes e trazidos até o leito do rio/lago e isso pode gerar interpretações equivocadas sobre a origem específica e posição geográfica da vegetação produtora (LIU *et al.* 2019). Entretanto, quando bem compreendida as questões fluviais e geomorfológicas envolvidas, o emprego dos fitólitos pode ser uma importante ferramenta, tal como observado nos estudos de NEUMANN *et al.* (2009), SANGEN *et al.* (2011), GARNIER *et al.* (2013), RAMÍREZ *et al.* (2019) e RASBOLD *et al.* (2020).

Por outro lado, os fitólitos, quando aplicados a estudos fluviais de pequenas bacias hidrográficas e de erosão possuem singular potencial em relação à cobertura vegetal, à robustez, às intempéries e baixa alteração química ao longo dos caminhos de deslocamento dos sedimentos. Estas características fazem dos fitólitos potenciais e adequados traçadores para estudos quantitativos de erosão (KRAUSHAAR *et al.* 2021).

## 2.5 Identificação e os sistemas de nomenclatura dos fitólitos

A identificação refere-se ao conhecimento sobre a produção de fitólitos e as respectivas plantas produtoras, visando minimizar os da redundância e multiplicidade. E para que isso seja entendido de maneira universal é necessário um sistema de nomenclatura e classificação que permita o reconhecimento desta relação taxonômica.

O objetivo de todo sistema de classificação é ordenar/organizar argumentos baseados nos atributos mais relevantes de uma determinada entidade, neste caso, os fitólitos. Para padronização de uma nomenclatura para os fitólitos, ao longo do tempo, os sistemas de nomenclatura fitolítica têm seguido três abordagens gerais: taxonômica, tipológica e taxonômico-tipológica (MADELLA *et al.* 2005, ICPT *et al.* 2019). A abordagem taxonômica procura estabelecer ligação direta entre um tipo de fitólito e um *táxon* de planta. É usada por muitos pesquisadores especializados em arqueologia e paleoecologia (MADELLA *et al.* 2005). Na tipológica não existe necessariamente uma ligação direta entre uma planta e o tipo de fitólito. Os morfotipos são descritos de acordo com as características visuais, sejam elas geométricas e/ou de aparência geral. Exemplos precursores desta classificação podem ser encontrados em BERTOLDI DE POMAR (1971) que propôs uma classificação estritamente morfológica, na qual subdividia em dois grupos: Microsilicofitólitos (estrobilolita, doliolita, bacilolita, petasusita, braquiolita, nuxolita) e Macrosilicofitólitos (prismatolite, aculeolite, flabelulite, longolite, proteolite). Novas aproximações de classificação foram propostas por PARRA & FLÓREZ (2001) que se basearam nos caracteres morfológicos dos fitólitos, não articulados, e seguiram parcialmente as diretrizes delineadas por Bertoldi de Pomar para nomenclatura. Eles propuseram um sistema baseado em três níveis: o morfotribo, o morfogênico e as morfoespécies; há também a escola australiana, com BOWDERY *et al.* (2001), que se basearam no fato de que os fitólitos

tos são tridimensionais, corpos que podem possuir mais de uma morfologia identificável ou diagnóstica, partindo de princípios geométricos, não subjetivos. A nomenclatura mais usada atualmente é uma abordagem taxonômico-tipológica que valoriza a informação taxonômica. Ela está apresentada no Código Internacional de Nomenclatura de Fitólitos (*International Code for Phytolith Nomenclature* ICPN 2.0) (ICPT 2019), que já está em sua segunda versão e apresenta as diretrizes para identificação morfológica dos fitólitos, em três níveis. Nesta versão também são apresentados os nomes revisados, diagnósticos, imagens e desenhos dos morfotipos que já haviam sido citados no ICPN 1.0, além de outros três novos. No total são apresentados os 19 morfotipos mais comumente encontrados em assembleias de fitólitos de solos modernos e fósseis, sedimentos e depósitos arqueológicos (ICPT 2019). Um glossário ilustrado de termos comuns para descrição também é fornecido.

### 3 ÍNDICES FITOLÍTICOS: INTERPRETAÇÃO DAS ASSEMBLEIAS

Eles são calculados a partir de diferentes assembleias e permitem aos pesquisadores estimar a composição (gramíneas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e árvores) e estrutura (campo *versus* floresta) da vegetação que gerou as assembleias preservadas em solos, paleossolos e sedimentos ao longo do tempo, e as condições de temperatura e umidade da área, tornando-se assim, uma ferramenta importante nos estudos de reconstituição paleoambiental e etnobotânica.

Os primeiros índices voltados a interpretação do significado ambiental e ecológico das assembleias foram propostos por DIESTER-HAAS *et al.* (1973), TWISS *et al.* (1987), TWISS (1992) e ALEXANDRE *et al.* (1997), Índice de aridez (*I<sub>ph</sub>*) (Eq. 1), Índice Climático (*I<sub>c</sub>*) (Eq. 2) e o Índice de Cobertura Arbórea (D/P) (Eq. 3), respectivamente. Eles são os mais utilizados e citados na literatura.

$$I_{ph} = \frac{(CHLORIDOID\ SADDLES)}{(CHLORIDOID\ SADDLES+PANICOID\ BILOBATES+CROSS)} \times 100$$

Eq. 1

$$I_c = \frac{(RONDEL+TRAPEZIFORM\ POLYLOBATE+TRAPEZIFORM\ SHORT\ CELL)}{(RONDEL+TRAPEZIFORM\ POLYLOBATE+TRAPEZIFORM\ SHORT\ CELL+SADDLE+CROSS+BILOBATE)} \times 100$$

Eq. 2

$$D/P = \frac{SPHEROID\ ORNATE}{(BILOBATE + CROSS + SADDLE + ACUTE\ BULBOUS + BULLIFORM\ FLABELLATE + ELONGATE)}$$

Eq. 3

Posteriormente novos índices foram calibrados/ajustado, por exemplo BREMOND *et al.* (2005, 2008) e NEUMANN *et al.* (2009) em

revisão do índice D/P. De modo geral, os índices têm aprimorado as interpretações das assembleias fósseis, juntamente com outros *proxies* ambientais. Frequentemente esses índices são calculados a partir de três grupos de subfamílias de gramíneas (*Pooideae*, *Chloridoideae* e *Panicoideae*) em dois padrões fotossintéticos (C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>) para gramíneas e grupos de plantas de hábitos arbóreo e arbustivos. Uma extensiva revisão sobre esse tema é apresentada em STRÖMBERG *et al.* (2018). No Brasil, até o momento apenas um novo índice foi proposto, o índice Pa/P (Palmae/Poaceae) (Pa/P= SPHEROID ECHINATE/Short-Cells + ACICULAR + BULLIFORM) por COE (2009). Essa autora, em estudo realizado na região de Cabo Frio, litoral fluminense, propôs esta relação visando auxiliar na interpretação da evolução de ambientes com significativa presença do morfotipo SPHEROID ECHINATE. Este morfotipo pode ser produzido por inúmeras famílias, porém possui significado taxonômico reconhecido para a família Arecaceae. Atualmente, à luz de estudos recentes já se tem claro que fitólitos produzidos pelas Arecaceae da América do Sul podem ser visualmente separados de outras famílias de monocotiledôneas (Bromeliaceae, Cannaceae, Marantaceae, Orchidaceae, Strelitziaceae e Zingiberaceae) com base nas diferenças dos morfotipos produzidos e na variação morfológica e de dimensões dos SPHEROIDS ECHINATES (WITTEVEEN *et al.* 2022)

### 4 COLEÇÕES DE REFERÊNCIAS DE FITÓLITOS MODERNOS

Coleções de referência representam uma importante ferramenta para o entendimento tanto quantitativo quanto qualitativo da produção de fitólitos nas plantas (ROVNER 1971). As coleções podem, ainda, ser extremamente úteis a estudos de botânica, etnobotânica, arqueologia, reconstituição paleoambiental, tendências de evolução pedogenética e evolução da paisagem.

Várias coleções de referência de fitólito de plantas modernas têm sido elaboradas em diferentes regiões do mundo (por exemplo, OLLENDORF *et al.* 1988, BOZARTH 1992, JONES & BRYANT JR. 1992, MERCADER *et al.* 2009, RAITZ 2012, COLLURA & NEUMANN 2017, VOS 2016, RICARDO *et al.* 2018, SOUZA 2019, MOZER 2021). Em geral, essas coleções apresentam informações quantitativas sobre concentrações de fitólitos (número de fitólitos por grama de material orgânico seco), conjuntos morfológicos e

dados morfométricos dos morfotipos catalogados (PREMATHILAKE *et al.* 2022).

As coleções permitem obter uma visão considerável sobre os problemas e as potencialidades de um determinado registro fitolítico por meio de comparações com as coleções de plantas modernas, além de informar quais plantas, em nível de família e, em poucos casos, espécie, são produtoras de fitólitos. SHARMA *et al.* (2019) e STRÖMBERG *et al.* (2018) indicando as espécies que já foram identificadas como produtoras de fitólitos em diferentes níveis e evidenciam que, grande quantidade de angiospermas, gimnospermas e pteridófitas são grandes produtoras de fitólitos, destacando as espécies de pteridófitas de Equisetaceae, grandes acumuladoras de sílica, porque usam o silício como nutriente. As famílias de Pteridaceae, Poaceae e Fabaceae são as que se destacam em termos de quantidade na produção (SHARMA *et al.* 2019).

Em revisão sobre o tema, MOZER (2021) organizou um quadro com informações a respeito de 37 coleções de referência já elaboradas entre 1960 e 2020 para as Américas do Sul e do Norte, Europa, África, Ásia e Oceania. De acordo com os resultados de revisão, no Brasil as coleções se iniciaram ainda na década de 1960 com o trabalho de CAVALCANTE (1968) sobre fitólitos de gramineas das Amazônia e do grupo de Luiz Gouveia Labouriau, no bioma Cerrado (SENDULSKY & LABOURIAU 1966, CAMPOS & LABOURIAU 1969, SILVA & LABOURIAU 1970, SÖNDAHL & LABOURIAU 1970, FIGUEIREDO & HANDRO 1971, LABOURIAU 1983).

As coleções são importantes e necessárias. Quanto mais se conhece sobre a produção em nível de espécies, subfamílias e famílias das plantas de uma dada fitofisionomia, melhor se definirá o significado taxonômico e ambiental dos morfotipos, sendo possível inferir o ambiente/ecologia em que as plantas que os produzem se desenvolveram (OSTERRIETH *et al.* 2009).

## 5 ESTUDOS FITOLÍTICOS NO BRASIL

No Brasil, a análise fitolítica é relativamente recente, porém, promissora e tem se destacado em duas frentes:

a) Sistemática de fitólitos em plantas modernas: elaboração de coleções de referência para subsidiar os estudos de reconstituição paleoambiental e cultural.

b) Comparação e interpretação de assembleias de fitólitos preservados em solos e sedimen-

tos: estudo propriamente dito de reconstituição paleoambiental, etno e arqueobotânico em conjunto com outras técnicas e *proxies* biológicos, sedimentares e pedológicos.

Após um hiato entre 1971 e 2008, uma nova fase de estudos de fitólitos no Brasil foi iniciada. Nesta nova fase, inicialmente os estudos eram baseados em coleções de zonas de tropicais de outros países, sobretudo África (CALEGARI 2008, COE 2009). Somente depois se tem as primeiras coleções mais sistematizadas e robustas para os biomas brasileiros. Dentre elas destacam-se as elaboradas por MEDEANIC *et al.* (2009) (vegetação litorânea); por RASBOLD *et al.* (2011); RAITZ (2012), CALEGARI *et al.* (2017a) (Campo e Floresta Ombrófila Mista com Araucária,); CECCHET (2012), FELIPE (2012) (Floresta Ombrófila Densa – Mata de Tabuleiro); COE *et al.* (2017a), COSTA *et al.* (2018), RICARDO *et al.* (2018), STEVANATO *et al.* (2019) (Caatinga); CALEGARI *et al.* (2017b) (campos nativos na Mata de Tabuleiro), SANTOS *et al.* (2015) e COE *et al.* (2017b) (Restinga); SOUZA (2019) (Floresta Estacional Semidecidual) e MOZER (2021) (Floresta Ombrófila Altomontana). Estas pesquisas têm embasado os estudos de assembleia preservadas em solos e auxiliado sobremaneira o entendimento sobre gênese de solos, para reconstituição paleoambiental e evolução da paisagem no Brasil.

O uso de fitólitos em estudos de reconstituição paleoambiental no Brasil ganhou impulso a partir de 2008. Desde então, a partir do conhecimento mais sólido sobre a produção, preservação e classificação de fitólitos das fitofisionomias do Brasil, foi possível ampliar o espectro de possibilidades de aplicação dessa técnica em diferentes disciplinas. Assim, a análise fitolítica tem ganhado adeptos a cada ano investigando aspectos fisiológicos, produção de fitólito, o papel do silício no desenvolvimento das plantas, questões taxonômicas ou para questões ambientais em diferentes regiões do país (CALEGARI 2014).

Visando demonstrar o avanço dos estudos fitolíticos no Brasil, LUZ *et al.* (2015) realizaram um levantamento de dados, cujos resultados demonstraram que no período de 2008 a 2013, aproximadamente 28 trabalhos foram publicados/divulgados no Brasil, no âmbito das coleções de referência, reconstituições paleoambientais e contextos arqueológicos. Neste mesmo sentido, em 2019 dois novos trabalhos foram apresentados sobre a evolução da análise fitolítica por AGUIAR *et al.* (2019) e SOUZA (2019). SOUZA (2019) de-

monstrou que houve aumento ainda maior no número de trabalhos realizados no Brasil (Figura 3) e destacou o ano de 2015 como o de maior número de publicações (20) no período entre 2013-2019, conforme pesquisa realizada no *Google Scholar*<sup>®</sup> ([www.scholar.google.com.br](http://www.scholar.google.com.br)), *Science Direct* ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) e no *site* da Sociedade Internacional de Fitólitos no campo bibliografias ([phytoliths.org/bibliography/](http://phytoliths.org/bibliography/)).

Ao atualizar esse levantamento, entre 1966 e 2022, usando as mesmas bases consultadas por SOUZA (2019), observa-se que proporcionalmente, a maioria das pesquisas realizadas no Brasil tem se dedicado a reconstituição paleoambiental (Figura 4). Uma lista contendo trabalhos publicados e trabalhos de conclusão de curso (graduação e pós-graduação) é apresentada como informação suplementar (Apêndice 1). Ademais, ao se fazer um levantamento no portal CAPES (Teses) nota-se que esses trabalhos, em sua maioria, têm sido realizados por pesquisadores da área das Ciências Humanas (Geografia e Arqueologia) e Geociências (Figura 1). Geograficamente os locais de pesquisa se concentram nas regiões sudeste e sul do Brasil, nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Isso reflete a distribuição geográfica dos primeiros pesquisadores a trabalhar com essa temática e seus respectivos grupos de pesquisas, bastante atuantes no país.

Esses levantamentos bibliográficos demonstram que as pesquisas com enfoque na reconstituição paleoambiental fazem uso de uma abordagem *multiproxy*, empregando a análise de fitólitos conjuntamente a outros bioindicadores, como pólen, espículas de esponjas e diatomáceas, confirmando assim, a importância da complementaridade desses *proxies* (CALEGARI 2014).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa breve revisão de pontos importantes envolvidos no entendimento das assembleias de fitólitos e levantamento sobre os estudos de fitólitos no Brasil pode ser um ponto de partida para aqueles que tem interesse na temática. Embora não esgote o tema, ela é importante uma vez que há uma carência de textos em português sobre a técnica, que é uma ferramenta importante para estudos ambientais, sobretudo os de reconstituição.

Destaca-se que a assembleia fitolítica preservada nos solos é um registro da vegetação local. Seu uso tem vantagens e desvantagens em relação a outros *proxies* biológicos, mas quando usada conjuntamente podem aportar informações e/ou interpretações mais refinadas sobre a história evolutiva de determinados ambientes.

Existe uma grande quantidade de informações publicadas a disposição dos que iniciam o

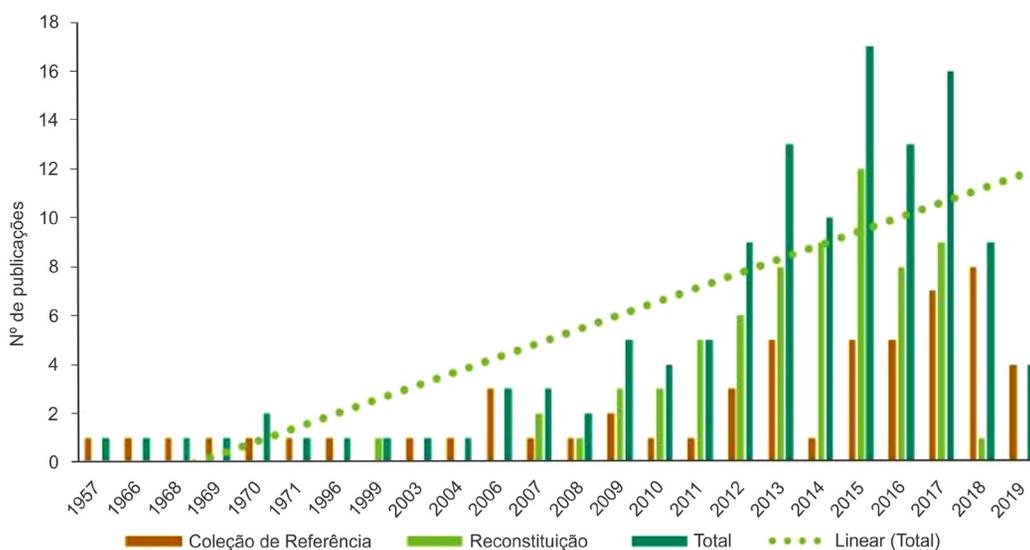


FIGURA 3 – Publicações sobre análise fitolítica, entre 1951 e 2019, realizadas no Brasil. Bases consultadas: *Google Scholar*<sup>®</sup>, *Science Direct* e no *site* da Sociedade Internacional de Fitólitos. Fonte: SOUZA (2019).

FIGURE 3 – Publications on phytolith analysis, between 1951 and 2019, carried out in Brazil. Databases consulted: *Google Scholar*<sup>®</sup>, *Science Direct* and the website of the International Society of Phytoliths. Source: SOUZA (2019).

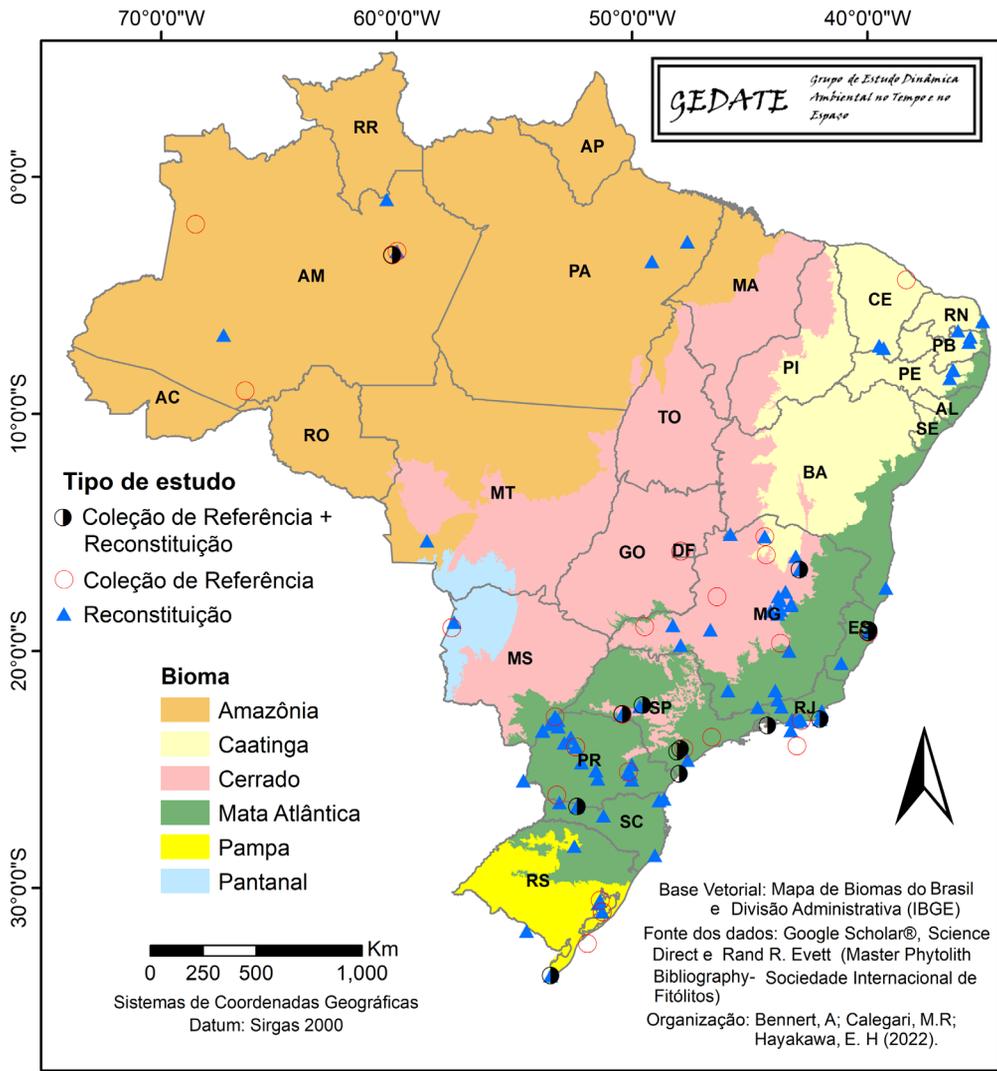


FIGURA 4 – Distribuição dos estudos de fitólito no Brasil (1951-2022). Bases consultadas: Google Scholar®, Science Direct e no site da Sociedade Internacional de Fitólitos. Fonte: Adaptado de SOUZA (2019).

FIGURE 4 – Distribution of phytolith studies in Brazil (1951-2022). Databases consulted: Google Scholar®, Science Direct and the website of the International Society of Phytoliths. Source: Adapted from SOUZA (2019).

emprego dessa técnica. E várias questões, algumas não tratadas nessa revisão, merecem atenção dos usuários, como aquelas relacionadas aos procedimentos de seleção de área e coleta em campo, métodos de extração de fitólitos em plantas. Esses são pontos cruciais que sempre deverão receber atenção especial dos usuários dessa técnica. Mas isso é tema para outra revisão!!!

Em resumo, com base na revisão apresentada, sobretudo sobre o uso de fitólitos no Brasil, constata-se que algumas lacunas ainda precisam ser resolvidas em trabalhos futuros:

I. Estudos mais aprofundados sobre os mecanismos de silicificação nas plantas e aplicações em estudos arqueológicos e ambientais;

II. Ampliação das coleções de referências;

III. Calibração dos índices fitolíticos de acordo com a produção dos biomas brasileiros e os processos tafonômicos condizentes com nossas condições tropicais;

IV. Padronização da nomenclatura de acordo com o Código Internacional de Nomenclatura (ICPN 2.0) e participação nas discussões junto ao comitê para as novas edições.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado e doutorado e pelo auxílio financeiro por meio do Projeto Pesquisador Visitante – PVE - CAPES PVE A115/2013 que custeou as pesquisas que deram suporte a este artigo. A Altair Bennert e ao Prof. Ericson H. Hayakawa pelo auxílio na elaboração da figura 4. Aos pareceristas da revista Derbyana pelas sugestões que enriqueceram o artigo.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A.E.X.; COE, H.H.G.; MADELLA, M.; CRUZ, M.L.B. 2019. O uso do bioindicador fitólito em estudos ambientais e arqueológicos no Brasil. *Revista GeoNordeste*, 1: 80-104. <https://doi.org/10.33360/RGN.2318-2695.2019.i1p80-104>
- ALBERT, R.M. 1995. Nuevo sistema de análisis descriptivo para fitolitos de sílice. *Pyrenae*, 26: 19-38.
- ALBERT, R.M.; BAMFORD, M.K.; CABANES, D. 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International*, 148(1): 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.026>
- ALBERT, R.M.; BAMFORD, M.K.; CABANES, D. 2009. Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains. *Quaternary International*, 193 (1-2): 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.008>
- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J.D. 1997. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering process. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 677-682. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00001-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00001-X)
- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J.-D.; LÉZINE, A.-M.; VINCENS, A.; SCHWARTZ, D. 1997. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136: 213 - 229. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00089-8)
- BARROSO, F.R.G.; GOMES, V.S.; CARVALHO, C.E.; LEDRU, M.P.; FAVIER, C.A.; ARAÚJO, F. S.; BREMOND, L. 2021. Phytoliths from soil surfaces and water reservoirs of the Brazilian semi-arid Caatinga. *Journal of South American Earth Sciences*, 108: 103180. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103180>
- BERTOLDI DE POMAR, H. 1971. Ensayo de clasificación morfológica de los silicofitolitos. *Ameghiniana*, 8(3-4): 317-328. <https://www.ameghiniana.org.ar/index.php/ameghiniana/article/view/1352>
- BOTTINELLI, N.; JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG, X. 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, 146(PA): 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>
- BOWDERY, D.; HART, D.M.; LENTFER, C.; WALLIS, L.A. 2001. A Universal Phytolith Key. In: J.-D. Meunier & F. Colin (Eds.) *Phytoliths - Applications in Earth Science and Human History*, 1<sup>st</sup>ed. Swets & Zeitlinger, p. 372. <https://doi.org/10.1201/noc9058093455>
- BOZARTH, S.R. 1992. Classification of phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains. In: G. Rapp & S.C. Mulholland (Eds.) *Phytolith Systematics*. New York, Springer, p. 193-214.
- BREMOND, L.; ALEXANDRE, A.; PEYRON, O.; GUIOT, J. 2005. Grass water stress estimated from phytoliths in West Africa. *Journal of Biogeography*, 32: 311-327. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01162.x>
- BREMOND, L.; ALEXANDRE, A.; WOOLLER, M.J.; HÉLY, C.; WILLIAMSON, D.; SCHÄFER, P.A.; MAJULE, A.; GUIOT, J. 2008. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Global and Planetary Change*, 61(3-4): 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.016>
- BRUSTOLIN, L.T. 2015. *Coleção de referência de fitólitos de campos nativos na floresta ombrófila densa - Mata de Tabuleiro* (Linhares, ES). Universidade Estadual do Oeste do Pa-

- raná Trabalho de Conclusão de Curso – Licenciatura em Geografia, 84 f.
- BUNZL, K. 2002. Transport of fallout radiocesium in the soil by bioturbation: a random walk model and application to a forest soil with a high abundance of earthworms. *Science of The Total Environment*, 293(1-3): 191-200. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00014-1)
- CABANES, D.; SHAHACK-GROSS, R. 2015. Understanding fossil phytolith preservation: The role of partial dissolution in paleoecology and archaeology. *PLoS ONE*, 10(5): 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125532>
- CALEGARI, M.R. 2008. *Ocorrência e significado paleoambiental do horizonte A húmico em Latossolos*. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, Tese de Doutorado, 261 f.
- CALEGARI, M.R. 2014. Estudos taxonômicos e coleções de referências de fitólitos no Brasil. *In: Botânica na América Latina: conhecimento, interação e difusão. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 65, Anais, Salvador, XXXIV ERBOT, p. 366-374.*
- CALEGARI, M.R.; VIDAL-TORRADO, P. 2020. Memórias bióticas de solos selecionados da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: condições ambientais e pedogênese. *In: M.B. e Silva, J.F. Lumberras, M.R. Coelho, & V. Á. de Oliveira (Eds.) EMBRAPA, Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC Do Maranhão (1ª ed.)*, p. 546-565.
- CALEGARI, M.R.; MADELLA, M.; VIDAL-TORRADO, P.; PESSEDA, L.C.R.; MARQUES, F.A. 2013. Combining phytoliths and  $\delta^{13}\text{C}$  matter in Holocene palaeoenvironmental studies of tropical soils: An example of an Oxisol in Brazil. *Quaternary International*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.11.012>
- CALEGARI, M.R.; LOPES PAISANI, S.D.; CECCHET, F.A.; DE LIMA EWALD, P.L.; OSTERRIETH, M.L.; PAISANI, J.C.; PONTELLI, M.E. 2017a. Phytolith signature on the Araucarias Plateau - Vegetation change evidence in Late Quaternary (South Brazil). *Quaternary International*, 434: 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.095>
- CALEGARI, M.R., MADELLA, M.; TAGLIARI BRUSTOLIN, L.; RUIZ PESSEDA, L.C.; BUSO, A.A.; FRANCISQUINI, M.I.; BENDASSOLLI, J.A.; VIDAL-TORRADO, P. 2017b. Potential of soil phytoliths, organic matter and carbon isotopes for small-scale differentiation of tropical rainforest vegetation: A pilot study from the Campos Nativos of the Atlantic Forest in Espírito Santo State (Brazil). *Quaternary International*, 437: 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.01.023>
- CAMPOS, A.C.; LABOURIAU, L.G. 1969. Corpos silicosos de gramíneas dos Cerrados – II. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 4: 143-151.
- CARNELLI, A.L.; MADELLA, M.; THEURILLAT, J.P. 2001. Biogenic silica production in selected alpine plant species and plant communities. *Annals of Botany*, 87(4): 425-434. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1355>
- CAVALCANTE, P.B. 1968. Contribuição ao estudos dos corpos silicosos das gramíneas amazônicas - I. Panicoidae (*Melinideae, Andropogoneae e Tripsaceae*) *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Botânica*, 30: 1-37.
- CECCHET, F.A. 2012. *Conjunto de Fitólitos dos Estratos Inferiores da Floresta Ombrófila Densa (Linhares – Espírito Santo): Subsídios para Reconstrução Paleoambiental*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, Trabalho de Conclusão de Curso – Licenciatura em Geografia, 100 f.
- CECCHET, F.A. 2015. *Análise de fitólitos aplicada a reconstrução paleoambiental (vegetação e clima) na superfície incompletamente aplainada vi – Campo Erê (SC) no Pleistoceno Tardio*. [Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus Francisco Beltrão, Dissertação de Mestrado em Geografia., 99 f. <http://tede.unioeste.br/handle/tede/1141>
- CHIAPINI, M.; SCHELLEKENS, J.; CALEGARI, M.R.; ALMEIDA, J.A.; BUURMAN, P.; CAMARGO, P.B.; VIDAL-TORRADO, P. 2018. Formation of black carbon rich

- 'sombrio' horizons in the subsoil – A case study from subtropical Brazil. *Geoderma*, 314: 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.031>
- COE, H.H.G. 2009. *Fitólitos como indicadores de mudanças na vegetação xeromórfica da região de Búzios / Cabo Frio, RJ, durante o Quaternário*. 2009. Universidade Federal Fluminense, Tese de Doutorado, 300 f.
- COE, H.H.G.; MACARIO, K.; GOMES, J.G.; CHUENG, K.F.; OLIVEIRA, F.; GOMES, P.R.S.; CARVALHO, C.; LINARES, R.; ALVES, E.; SANTOS, G.M. 2014. Understanding Holocene variations in the vegetation of Sao Joao River basin, southeastern coast of Brazil, using phytolith and carbon isotopic analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415: 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.01.009>
- COE, H.H.G.; RICARDO, S.F.; DE SOUSA, L.D.O.F.; DIAS, R.R. 2017a. Characterization of plant and modern soil phytolith assemblages of caatinga as reference for palaeoenvironmental reconstructions. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 8(2): 9-21.
- COE, H.H.G.; RAMOS, Y.B.M.; SANTOS, C.P.; SILVA, A.L.C.; SILVESTRE, C.P.; BORRELLI, N.; DE SOUSA, L.O.F. 2017b. Dynamics of production and accumulation of phytolith assemblages in the Restinga of Maricá, Rio De Janeiro, Brazil. *Quaternary International*, 434: 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.071>
- COLLURA, L.V.; NEUMANN, K. 2017. Wood and bark phytoliths of West African woody plants. *Quaternary International*. 434: 149-152 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.070>
- COSTA, F.G.C.M.; KLEIN, D.E.; PHILBRICK, C.T.; BOVE, C.P. 2018. Silica bodies in leaves of neotropical Podostemaceae: taxonomic and phylogenetic perspectives. *Annals of Botany*, 122: 1187-1201. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy121>
- COSTA, L.M.; REIS, A.L.M.; FONSECA, C.F. 2019. Estabilidade de biominerais com ênfase em sílica biogênica e sua importância em estudos do Quaternário. *Revista de Ciências Humanas*, 19(1): 111-125. <https://orcid.org/0000-0003-3756-489X>
- COUSINS, I.T.; MACKAY, D.; JONES, K.C. 1999. Measuring and modelling the vertical distribution of semi-volatile organic compounds in soils. II: model development. *Chemosphere*, 39(14): 2519-2534. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00165-4](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00165-4)
- DIESTER-HAAS L.; SCHRADER, H.J.; THIEDE, J. 1973. Sedimentological and paleoclimatological investigations of two pelagic ooze cores off Cape Barbas, North-West Africa. *Meteor Forschungsergebnisse: Reihe C, Geologie und Geophysik*: 19-66. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.548418>
- DREES, L.R.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; SENKAYI, A.L. 1989. Silica in Soils: Quartz and Disordered Silica Polymorphs. In: J.B. Dixon & S.B. Weed (eds.) *Minerals in Soil Environments*. SSSA Book Series. 2<sup>nd</sup> ed., p. 913-974. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c19>
- DÍEZ-PASTOR, J.-F.; LATORRE-CARMONA, P.; ARNAIZ-GONZÁLEZ, Á.; RUIZ-PÉREZ, J.; ZURRO, D. 2020. "You Are Not My Type": An Evaluation of Classification Methods for Automatic Phytolith Identification. *Microscopy and Microanalysis*, 26(6): 1158-1167. <https://doi.org/10.1017/S1431927620024629>
- EFREMOV, I. 1940. Taphonomy: new branch of paleontology. *Pan-American Geologist*, 74: 81-93.
- EPSTEIN, E. 1999a. SILICON Emanuel Epstein. *Annual Review of Plant Biology*, 50: 641-664. <https://doi.org/10.1038/mt.sj.6300107>
- EPSTEIN, E. 1999b. The discovery of the essential elements. In: S.D. Kung and S.F. Yang (Ed.) *Discoveries in Plant Biology* (Vol. 3, p. 1-13). World Scientific. <https://doi.org/10.1038/mt.sj.6300107>
- EPSTEIN, E. 2001. Silicon in plants: Facts vs. concepts. *Studies in Plant Science*, 8: 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80005-7](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80005-7)
- EPSTEIN, E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155(2):

- 155-160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>
- FELIPE, P.L.L. 2012. *Coleção de referência de fitólitos de Eudicotiledoneae da Floresta Ombrófila Densa: Subsídios para estudos paleoambientais em regiões tropicais*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Trabalho de Conclusão de Curso – Licenciatura em Geografia, 62 f.
- FIGUEIREDO, R.C.L; HANDRO, W. 1971. Corpos silicosos de gramíneas dos cerrados V. *In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO*, 3, (M.G. Ferri, coord.), p. 215-231.
- FISHKIS, O.; INGWERSEN, J.; STRECK, T. 2009. Phytolith transport in sandy sediment: Experiments and modeling. *Geoderma*, 151(3-4): 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.003>
- FISHKIS, O.; INGWERSEN, J.; LAMERS, M.; DENYSENKO, D.; STRECK, T. 2010. Phytolith transport in soil: A laboratory study on intact soil cores. *European Journal of Soil Science*, 61(4): 445-455. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01257.x>
- FREDLUND, G.G.; TIESZEN, L.T. 1994. Modern Phytolith Assemblages from the North American Great Plains. *Journal of Biogeography*, 21(3): 321-335. <https://doi.org/10.2307/2845533>
- FREDLUND, G.G.; TIESZEN, L.L. 1997. Calibrating grass phytolith assemblages in climatic terms: Application to late Pleistocene assemblages from Kansas and Nebraska. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136(1-4): 199-211. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00040-0)
- GALLAHER, T.J.; AKBAR, S.Z.; KLAHS, P.C.; MARVET, C.R.; SENSKE, A.M.; CLARK, L.G.; STRÖMBERG, C.A.E. 2020. 3D shape analysis of grass silica short cell phytoliths: a new method for fossil classification and analysis of shape evolution. *New Phytologist*, 228(1): 376-392. <https://doi.org/10.1111/nph.16677>
- GALVÃO, D.C. 2019. *Evolução do Paleoambientes e da Paisagem Quaternária no Sudeste do Piauí*. Universidade Federal Pernambuco, Tese de Doutorado em Arqueologia, 151 p.
- GAO, G.; JIE, D.; WANG, Y.; LIU, L.; LIU, H.; LI, D.; LI, N.; SHI, J.; LENG, C. 2018. Phytolith reference study for identifying vegetation changes in the forest–grassland region of northeast China. *Boreas*, 47(2): 481-497. <https://doi.org/10.1111/bor.12280>
- GARNIER, A.; NEUMANN, K.; EICHHORN, B.; LESPEZ, L. 2013. Phytolith taphonomy in the middle- to late-Holocene fluvial sediments of Ounjougou (Mali, West Africa). *The Holocene*, 23(3): 416-431. <https://doi.org/10.1177/0959683612463102>
- GRAVE, P.; KEALHOFER, L. 1999. Assessing Bioturbation in Archaeological Sediments using Soil Morphology and Phytolith Analysis. *Journal of Archaeological Science*, 26(10): 1239-1248. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0363>
- HART, D.M. 2003. The influence of soil fauna on phytolith distribution in an Australian soil. *In: D.M. Hart & L.A. Wallis (Eds.) Phytolith an starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: the state of the art*. Pandanus Books, Terra Aust, p. 83-92.
- HART, D.M.; HUMPHREYS, G.S. 1997. The Mobility of Phytolith in Soils: Pedological considerations. 1997. *In: PRIMER ENCUESTRO EUROPEO SOBRE EL ESTUDIO DE FITOLITOS / FIRST EUROPEAN MEETING ON PHYTOLITH RESEARCH*, Barcelona, Centro de Ciencias Medioambientales (Spain), Madrid (Spain : Region). Consejería de Educación y Cultura, Spain, Dirección General de Investigación Científica y Técnica, *Anais*, p. 292.
- HART, D.M.; HUMPHREYS, G.S. 2003. Phytolith depth functions in surface regolith materials. *In: Roach I.C. ed. 2003. Advances in Regolith*, p. 159-163. CRC LEME. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1959.14/1179690>
- HE, C.; WANG, L.; LIU, J.; LIU, X.; LI, X.; MA, J.; LIN, Y. XU, F. 2013. Evidence for ‘silicon’ within the cell walls of suspension-cultured rice cells. *New Phytologist*, 200(3): 700-709. <https://doi.org/10.1111/nph.12401>

- HODSON, M.J.; WHITE, P.J.; MEAD, A.; BROADLEY, M.R. 2005. Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. *Annals of Botany*, 96(6): 1027-1046. <https://doi.org/10.1093/aob/mci255>
- HODSON, M.J.; SONG, Z.; BALL, T.B.; ELBAUM, R.; STRUYF, E. 2020. Editorial: Frontiers in Phytolith Research. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00454>
- HONAINÉ, M.F.; ZUCOL, A.F.; OSTERRIETH, M.L. 2009. Phytolith analysis of Cyperaceae from the Pampean region, Argentina. *Australian Journal of Botany*, 57(6): 512-523. <https://doi.org/10.1071/BT09041>
- HORN, A.H.; LEPSCH, I.F.; SAMPAIO, R.A.; RODRIGUES, M.N.; ALVARENGA, A.C.; OLIVEIRA, E.S.A. 2014. Heavy metals and aluminum content inside silicophytoliths from *Ricinus communis*, *Andropogon arundinaceus* and *Brachiaria decumbens* grown on soils added with sewage sludge and heavy metal salts (Brazil). *Romanian Journal of Mineral Deposits*, 87(2): 43-46.
- HUMPHREYS, G.S.; HART, D.M.; SIMONS, N.; FIELD, R.J. 2003. Phytoliths as indicators of process in soils. In: D.M. Hart & L.A. Wallis (Eds.) *Phytolith and starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: the state of the art*. Pandanus Books, p. 93-104.
- HYLAND, E.; SMITH, S.Y.; SHELDON, N.D. 2013. Representational bias in phytoliths from modern soils of central North America: Implications for paleovegetation reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 374: 338-348. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.01.026>
- ICPT - INTERNATIONAL COMMITTEE FOR PHYTOLITH TAXONOMY (NEUMANN, K.; STRÖMBERG, C.A.E.; BALL, T.; ALBERT, R.M.; VRYDAGHS, L.; CUMMINGS, L.S.). 2019. International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany*, 124(2): 189-199. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz064>
- ILER, R.K. 1979. *The chemistry of silica*. John Wiley & Sons, 896 p.
- JANZEN, H.H. 2016. The Soil Remembers. *Soil Science Society of America Journal*, 80(6): 1429-1432. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.05.0143>.
- JENKINS, E. 2009. Phytolith taphonomy: a comparison of dry ashing and acid extraction on the breakdown of conjoined phytoliths formed in *Triticum durum*. *Journal of Archaeological Science*, 36(10): 2402-2407. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.06.028>
- JONES, J.G.; BRYANT JR; V.M. 1992. Phytolith taxonomy in selected species of Texas cacti. In: S.C. Rapp, G. Mulholland (Eds.) *Phytolith Systematics*. Plenum Press, p. 215-238.
- JOUQUET, P.; JAMOTEAU, F.; MAJUMDAR, S.; PODWOJEWSKI, P.; NAGABOVANALLI, P.; CANER, L.; BARBONI, D.; MEUNIER, J.-D. 2020. The distribution of Silicon in soil is influenced by termite bioturbation in South Indian forest soils. *Geoderma*, 372: 114362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114362>
- KAMMER, A.P. 2018. *Reconstituição paleoambiental da vegetação da estação ecológica de Assis-SP – A trajetória evolutiva do Cerrado no Holoceno*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Trabalho de Conclusão de Curso- Licenciatura em Geografia, 58 f.
- KÄMPF, N.; CURI, N. 2012. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: J.C. Ker, N. Curi, C.E.G.R. Schaefer, & P. Vidal-Torrado (Eds.) *Pedologia: Fundamentos*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1ª ed., p. 207-302).
- KASTE, J.M.; HEIMSATH, A.M.; BOSTICK, B.C. 2007. Short-term soil mixing quantified with fallout radionuclides. *Geology*, 35(3): 243. <https://doi.org/10.1130/G23355A.1>
- KATZ, O. 2018. Plant silicon and phytolith research and the earth-life superdiscipline. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1-5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01281>
- KNOLL, A.H. 2003. Biomineralization and Evolutionary History. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54(1): 329-356. <https://doi.org/10.2113/0540329>

- KRAUSHAAR, S.; KONZETT, M.; KIEP, J.; SIEBERT, C.; MEISTER, J. 2021. Suitability of phytoliths as a quantitative process tracer for soil erosion studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(9): 1797-1808. <https://doi.org/10.1002/esp.5121>
- LABOURIAU, L.G. 1983. Phytolith work in Brazil, a minireview. *The Phytolitharien*, 2(2): 1-5.
- LI, Z.; DE TOMBEUR, F.; LINDEN, C. VANDER, CORNELIS, J.-T.; DELVAUX, B. 2020. Soil microaggregates store phytoliths in a sandy loam. *Geoderma*, 360: 114037. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114037>
- LISTO, D.G.S.; BALDER, R.F.T.M.; BARROS CORRÊA, A.C.; RAMOS, D.A.M.C.; CALEGARI, M.R. 2022. Weathering pits as a geochronometer of environmental changes in the State of Pernambuco, Northeastern Brazil. *Quaternary International*. no prelo, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.10.004>
- LIU, L.; LI, D.; JIE, D.; LIU, H.; GAO, G.; LI, N. 2019. Translocation of Phytoliths Within Natural Soil Profiles in Northeast China. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1254. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01254>
- LUTWICK, L.E.; JOHNSTON, A. 1969. CUMULIC SOILS OF THE ROUGH FESCUE PRAIRIE-POPLAR TRANSITION REGION. *Canadian Journal of Soil Science*, 49(2): 199-203. <https://doi.org/10.4141/cjss69-027>
- LUZ, L.D.; KALINOVSKI, E.C.Z.; PAROLIN, M.; SOUZA FILHO, E.E. 2015. Estágio Atual do Conhecimento sobre Fitólitos no Brasil. *Terrae Didática*, 11(1): 52-64.
- MA, J.F. 2003. Functions of Silicon in Higher Plants. In: W.E.G. Müller (ed.) *Silicon Biomineralization: Biology – Biochemistry – Molecular Biology – Biotechnology*. Progress in Molecular and Subcellular Biology. Berlin, Heidelberg, Springer, 33, 127-147. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55486-5>
- MACEDO, R.S. 2013. *Pedogênese e indicadores pedoarqueológicos em Terra Preta de Índio no município de Iranduba - AM*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz ESALQ/USP, Tese de Doutorado, 177 f.
- MACEDO, R.S.; MADELLA, M.; CALEGARI, M.R.; TEIXEIRA, G.; MARTINS, G.C.; VIDAL-TORRADO, P. 2015. Coleção de referência de fitólitos de plantas como subsídio para identificação e classificação de fitólitos em solos. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, Natal, *Anais*, 1-4.
- MACHADO, D.O.B.F.; CHUENG, K.F.; COE, H.H.G.; SILVA, A.C.; COSTA, C.R. 2021. Paleoenvironmental reconstruction of the headwaters of the preto river, Minas Gerais state, Brazil, through siliceous bioindicators. *Journal of South American Earth Sciences*, 108: 103349. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103349>
- MACHADO, D. O. B. F.; COE, H. H. G.; BANDEIRA, D. R.; SOUZA, R.; RASBOLD, G. G.; CHUENG, K. F.; DIAS, R. R.; FERREIRA, J.; VIEIRA, C.V.; SÁ, J. C. 2022. Palaeoenvironmental reconstruction through phytolith analysis in the Casa de Pedra shell mound archaeological site, São Francisco do Sul, Santa Catarina, Brazil. *Vegetation History and Archaeobotany*. <https://doi.org/10.1007/s00334-022-00899-6>
- MADELLA, M.; ALEXANDRE, A.; BALL, T. 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany*, 96(2): 253-260. <https://doi.org/10.1093/aob/mci172>.
- MADELLA, M.; LANCELOTTI, C. 2012. Taphonomy and phytoliths: A user manual. *Quaternary International*, 275: 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.008>
- MARQUES, A. L. 2019. *Evolução da Paisagem e Ocorrência de Latossolos Húmicos nos Brejos de Altitude da Paraíba*. Universidade Federal da Paraíba, Dissertação de mestrado em Ciência do Solo, 109 f.
- MEDEANIC, S.; CARDOZZO, C.V.; CORREIA, I.C.S. 2009. Notas sobre Fitólitos em *Androtrichum trigynum* (Spr.) Pfeiffer no Extremo Sul do Brasil: Tipos Morfológicos e uso nas Paleoreconstruções Costeiras. *Gravel*, 7(1): 31-36.
- MERCADER, J.; BENNETT, T.; ESSELMONT, C.; SIMPSON, S.; WALDE, D. 2009.

- Phytoliths in woody plants from the Miombo woodlands of Mozambique. *Annals of Botany*, 104(1): 91-113. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp097>
- MERCADER, J.; CLARKE, S.; BUNDALA, M.; FAVREAU, J.; INWOOD, J.; ITAMBU, M.; LARTER, F.; LEE, P.; LEWISKI-MCQUAID, G.; MOLLEL, N.; MWAMBWIGA, A.; PATALANO, R.; SOTO, M.; TUCKER, L.; WALDE, D. 2019. Soil and plant phytoliths from the Acacia-Commiphora mosaics at Oldupai Gorge (Tanzania). *PeerJ*, 2019(12). <https://doi.org/10.7717/PEERJ.8211>
- MOZER, J.H. 2021. *Coleção de Referência de Fitólitos e Reconstituição Paleoambiental da Floresta Ombrófila Densa Altomontana no Parque Estadual Carlos Botelho - SP*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação de Mestrado em Geografia, 205 f.
- MULHOLLAND, S.C. 1989. Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: a comparison to general patterns. *Journal of Archeological Science*, 16: 489-511. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1155-1>
- MULHOLLAND, S.C.; RAPP, G. 1992. Phytolith Systematics: An Introduction. In: S.C. Mulholland & G. Rapp (eds.) *Phytolith Systematics: Emerging Issues*, Advances in Archaeological and Museum Science, v.1, p. 1-13.
- NEUMANN, K.; FAHMY, A.; LESPEZ, L.; BALLOUCHE, A.; HUYSECOM, E. 2009. The Early Holocene palaeoenvironment of Ounjougou (Mali): Phytoliths in a multiproxy context. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 276(1-4): 87-106. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.03.001>
- NEUMANN, K.; FAHMY, A.G.; MÜLLER-SCHNEEBEL, N.; SCHMIDT, M. 2017. Taxonomic, ecological and palaeoecological significance of leaf phytoliths in West African grasses. *Quaternary International*, 434: 15-32. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.039>
- OLIVEIRA, L.A. 2009. *Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao Cádmio*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- ESALQ/USP, Tese de Doutorado, 154f.. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-03122009-094223/publico/Doutorado.pdf>
- OLLENDORF, A.L.; MULHOLLAND, S.C.; RAPP, G. 1988. Phytolith analysis as a means of plant identification: *Arundo donax* and *Phragmites communis*. *Annals of Botany*, 61: 209-214. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087544>
- OSTERRIETH, M.; MADELLA, M.; ZURRO, D.; FERNANDA ALVAREZ, M. 2009. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International*, 193(1-2): 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.002>
- PARRA, S.L.N.; FLÓREZ, M.M.T. 2001. Propuesta de clasificación morfológica para los fitolitos altoandinos colombianos. *Resumen*, 16 (January): 35-66.
- PEARSALL, D.M. 1982. Phytolith Analysis: Applications of a New Paleoethnobotanical Technique in Archeology. *American Anthropologist*, 84(4): 862-871. <https://doi.org/10.2307/676497>
- PEARSALL, D.M. 1989. *Paleoethnobotany: A handbook of procedures*. Academic Press, Inc., 1<sup>st</sup> ed.
- PEARSALL, D.M. 2016. The Phytoliths in the Flora of Ecuador project: Perspectives on phytolith classification, identification, and establishing regional phytolith databases. *Journal of Archeological Science*, 68: 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.06.014>
- PIPERNO, D.R. 1988. The Interpretation of Phytolith Assemblages: Method and Theory. In: *Phytolith Analysis* Elsevier, p. 131-167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-557175-3.50010-6>
- PIPERNO, D. 2006. *Phytoliths : a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*. AltaMira Press.
- PREMATHILAKE, R.; AKHILESH, K.; ANUPAMA, K.; PRASAD, S.; GUNNELL, Y.; ORUKAIMANI, G.; PAPPU, S. 2022. Issues of phytolith taphonomy at

- Palaeolithic sites: Investigation and results from Attirampakkam, India. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 42: 103357. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103357>
- RAITZ, E. 2012. *Coleção de referência de silicofitólitos da flora do Sudoeste do Paraná: subsídios para estudos paleoambientais* Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação de Mestrado. <http://tede.unioeste.br/handle/tede/1211>
- RAMÍREZ, A.I.A.; RASBOLD, G.G.; PAROLIN, M.; STEVAUX, J.C. 2019. Phytoliths and seeds in fluvial island paleoenvironment reconstruction (interaction with pollen analysis). *Journal of South American Earth Sciences*, 89: 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.011>
- RASBOLD, G.G.; MONTEIRO, M.R.; PAROLIN, M.; CAXAMBÚ, M.G.; PESSENDA, L.C.R. 2011. Caracterização dos tipos morfológicos de fitólitos presentes em *Butia paraguayensis* (Barb. Rodr.) L. H. Bailey (Arecaceae). *Iheringia*, 66: 2, 265-270.
- RASBOLD, G.G.; STEVAUX, J.C.; PAROLIN, M.; LELI, I.T.; LUZ, L.D.; BRITO, H.D. 2020. Phytoliths indicate environmental changes correlated with facies analysis in a paleo island-lake, Upper Paraná River, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 99: 102513. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102513>
- RASHID, I.; MIR, S.H.; ZURRO, D.; DAR, R.A.; RESHI, Z.A. 2019. Phytoliths as proxies of the past. *Earth-Science Reviews*, 194: 234-250. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2019.05.005>
- RAVEN, J.A. 2001. Chapter 3 - Silicon transport at the cell and tissue level. *Studies in Plant Science*, 8: 41-55. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80007-0](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80007-0)
- RICARDO, S.D.F.; COE, H.H.G.; DIAS, R.R.; DE SOUSA, L.O.F.; GOMES, E. 2018. Reference collection of plant phytoliths from the Caatinga biome, Northeast Brazil. *Flora*, 249: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.09.003>
- RANULPHO, R. 2016. *Fitólitos em depósitos de colúvio do quaternário superior na face nordeste da Bacia Sedimentar do Araripe/CE: significado paleoambiental*. Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado em Geografia, 102 f.
- RODRIGUES, B.M. 2019. *Bioturbação e distribuição de fitólitos em Latossolos da Depressão Periférica Paulista*. Escola Superior de Agricultura – ESALQ/USP, Dissertação de Mestrado em Ciências, 80 p.
- ROVNER, I. 1971. Potential of opal phytoliths for use in palaeoecological reconstruction. *International Research*, 1(3): 345-359. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90070-6)
- RUNGE, F. 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa - Quantities, shapes, classification, and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 107(1-2): 23-53. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(99\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00018-4)
- RUPRECHT, F. 1866. *Geobotanical investigations on chernozem*. USSR, Academy of Science.
- SANGEN, M.; NEUMANN, K.; EISENBERG, J. 2011. Climate-induced fluvial dynamics in tropical Africa around the last glacial maximum? *Quaternary Research*, 76(3): 417-429. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.08.002>
- SANTOS, C.P.; COE, H.H.G.; BORRELLI, N.; SILVA, A.L.C.; SOUSA, L.O.F.; RAMOS, Y. B. M.; SILVESTRE, C. P.; SEIXAS, A. P. 2015. Opal phytolith and isotopic studies of "Restinga" communities of Maricá, Brazil, as a modern reference for paleobiogeoclimatic reconstruction. *Brazilian Journal of Oceanography*, 63(3). <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-87592015086606303>
- SANTOS, K.R.; CALEGARI, M.R. 2020. Coleção de referência de fitólitos da Floresta Ombrófila Mista com Araucária (Abelardo Luz, Santa Catarina). In: *Encontro Anual de Iniciação Científica e Inovação da Unioeste*, 6, Unioeste – Cascavel, 5 p.
- SENDULSKY, T.; LABOURIAU, L.G. 1966. *Corpos Silicosos de Gramíneas dos Cerrados - I. Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 38: 159-185.
- SHANBHAG, R.R.; HARIT, A.; CHEIK, S.; CHAUDHARY, E.; BOTTINELLI, N.;

- SUNDARARAJ, R.; JOUQUET, P. 2019. Litter quality affects termite sheeting production and water infiltration in the soil. *Sociobiology*, 66(3): 491-499. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v66i3.3741>
- SHARMA, R.; KUMAR, V.; KUMAR, R. 2019. Distribution of phytoliths in plants: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(2): 123-148. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1522838>
- SILVA, S. T.; LABORIAU, L.G. 1970. Corpos Silicosos de Gramíneas dos Cerrados III. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 5: 167-182.
- SILVANETO, E.C.; CALEGARI, M.R.; PEREIRA, M.G.; MARANHÃO, D.D.C.; SCHIAVO, J.A.; FONTANA, A.; FERNANDES, J.C.F. 2018. Phytoliths as indicators of pedogenesis and paleoenvironmental changes in Spodosols of the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of The Total Environment*, 636: 1070-1080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.313>
- SILVA NETO, E.C.; PEREIRA, M.G.; CARVALHO, M.A.; CALEGARI, M.R.; SCHIAVO, J.A.; DE PAULA SÁ, N.; DOS ANJOS, L.H.C.; PESSENDA, L.C.R. 2019. Palaeoenvironmental records of Histosol pedogenesis in upland area, Espírito Santo State (SE, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 95: 102301. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102301es>
- SÖNDAHL, M.B.I.; LABOURIAU, L.G. 1970. Corpos Silicosos de Gramíneas dos Cerrados - IV. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 5: 183-207.
- SOUZA, E. 2019. *Reconstituição Paleoambiental a partir do sinal fitolítico na ESEC Caetetus – Gália (SP)*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação de Mestrado em Geografia, 170 f.
- STEVANATO, M.; RASBOLD, G.G.; PAROLIN, M.; DOMINGOS LUZ, L.; LO, E.; WEBER, P.; TREVISAN, R.; GALEAZZI CAXAMBU, M. 2019. New characteristics of the papillae phytolith morphotype recovered from eleven genera of cyperaceae. *Flora*, 253: 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.03.012>
- STRÖMBERG, C.A.E. 2002. The origin and spread of grass-dominated ecosystems in the Late Tertiary of North America: preliminary results concerning the evolution of hypsodony. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 177: 59-75. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00352-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00352-2)
- STRÖMBERG, C.A.E. 2009. Methodological concerns for analysis of phytolith assemblages: Does count size matter? *Quaternary International*, 193(1-2): 124-140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.11.008>
- STROMBERG, C.A.E.; DI STILIO, V.; SONG, Z. 2016. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology*, 30: 1286-1297. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12692>
- STRÖMBERG, CAROLINE A.E.; DUNN, R.E.; CRIFÒ, C.; HARRIS, E.B. 2018. Phytoliths in Paleoecology: Analytical Considerations, Current Use, and Future Directions. In: D.A. Croft *et al.* (Eds.) *Methods in paleoecology: reconstructing cenozoic terrestrial environments and ecological communities*. Springer International Publishing AG, p. 235-287. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94265-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94265-0_12)
- SUNDUE, M. 2009. Silica bodies and their systematic implications in Pteridaceae (Pteridophyta). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(4): 422-435. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.01012.x>
- THORN, V. 2007. Phytoliths in palaeoecology. *Geology Today*, 23(4): 153-157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2007.00624.x>
- TREMBATH-REICHERT, E.; WILSON, J.P.; MCGLYNN, S.E.; FISCHER, W.W. 2015. Four hundred million years of silica biomineralization in land plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(17): 5449-5454. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500289112>
- TWISS, P.C. 1992. Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths. In: G. Rapp & S.C. Mulholland (eds.) *Phytolith Systematics: Emerging Issues*. AAMS, v.1, p. 113-128.

- TWISS, P.C.; DORT JR, W.; SORENSON, C.J. 1987. Grass-opal phytoliths as climatic indicators of the Great Plains Pleistocene. *In*: W.C. Johnson (Ed.), *Quaternary environments of Kansas*. Guidebook Series, Kansas Geological Survey, 1<sup>st</sup> ed., v. 5., p. 179-188.
- VOS, D. 2016. Plant Collecting in Jordan for a Phytolith Reference Collection. *Palestine Exploration Quarterly*, 148(3): 217-219. <https://doi.org/10.1080/00310328.2016.1209296>
- VRYDAGHS, L.; BALL, T.B.; DEVOS, Y. 2016. Beyond redundancy and multiplicity. Integrating phytolith analysis and micromorphology to the study of Brussels Dark Earth. *Journal of Archaeological Science*, 68: 79-88. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2015.09.004>
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. 1971. Biogenic Opal in Ohio Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 35(6): 1004-1010. <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500060041x>
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. 1973. Scanning Electron Microscopy of Opaque Opaline Forms Isolated from Forest Soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 37(4): 647-650. <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040047x>
- WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; DREES, L.R. 1977. Silica in Soils: Quartz, Cristobalita, Trydimite, and Opal. *In*: J. B. Dixon & S. B. Weed (Eds.) *Minerals in soil environments*. Soil Sci. Soc. Am. Inc., p. 471-552.
- WILKINSON, M.T.; HUMPHREYS, G. S. 2005. Exploring pedogenesis via nuclide-based soil production rates and OSL-based bioturbation rates. *Soil Research*, 43(6): 767. <https://doi.org/10.1071/SR04158>
- WILKINSON, M.T.; RICHARDS, P.J.; HUMPHREYS, G.S. 2009. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. *Earth-Science Reviews*, 97(1-4): 257-272. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.09.005>
- WITTEVEEN, N.H.; HOBUS, C. E. M.; PHILIPA, A.; PIPERNO, D. R.; MICHAELA, C. N. H. 2022. The variability of Amazonian palm phytoliths. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 300: 104613. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104613>
- ZURRO, D. 2018. One, two, three phytoliths: assessing the minimum phytolith sum for archaeological studies. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10: 1673-1691. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0479-4>

*Endereço dos autores:*

Marcia Regina Calegari\* – Colegiado de Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Pernambuco, 1777, Centro, CEP 85960-000, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil. *E-mail*: [marciareg\\_calegari@hotmail.com](mailto:marciareg_calegari@hotmail.com)

Erica de Souza, Jonathan Harrison Mozer – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Pernambuco, 1777, Centro, CEP 85960-000, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil. *E-mails*: [geo\\_eri@hotmail.com](mailto:geo_eri@hotmail.com), [jonathanmozer09@gmail.com](mailto:jonathanmozer09@gmail.com)

Luciane Marcolin – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, CEP 81530-001, Curitiba, PR, Brasil. *E-mail*: [lucianemarcolin@hotmail.com](mailto:lucianemarcolin@hotmail.com)

Christiane Farias da Fonseca – Instituto Federal do Sertão Pernambucano, IFSertãoPE, Campus Ouricuri, Estrada do Tamboril, S/N, Cep: 56.200-000, Ouricuri/PE. *E-mail*: [christianne.farias@ifsertao-pe.edu.br](mailto:christianne.farias@ifsertao-pe.edu.br)

\*Autor correspondente

*Artigo submetido em 15 de novembro de 2022, aceito em 15 de dezembro de 2022.*



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.