

USOS E POTENCIALIDADES DAS MEDIDAS DE SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NOS SOLOS DA AMAZÔNIA: UMA REVISÃO

USOS Y POTENCIALIDADES DE LAS MEDIDAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA EN LOS SUELOS DEL AMAZONAS: UNA REVISIÓN

USES AND POTENTIALITIES OF THE MEASURES OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN AMAZONIAN SOILS: A REVIEW

Wildson Benedito Mendes Brito*
mcesarsolos@gmail.com

Milton Cesar Costa Campos**

Fernando Gomes Souza***

Alan Ferreira Leite de Lima*

Flávio Pereira Oliveira**

Marcelo Tavares Nunes*****

Jose Mauricio Cunha*

Douglas Marcelo Pinheiro da Silva*

* Universidade Federal do Amazonas, Brasil

**Universidade Federal da Paraíba, Brasil

***Universidade Federal de Roraima, Brasil

Resumo

A demanda por métodos alternativos de avaliação qualitativa do solo que auxiliem no planejamento e tomada de decisão agrícola e política tem crescido nas últimas décadas. O alto custo e tempo necessário para levantamentos de campo são entraves que oneram a obtenção de conhecimento para o correto manejo do solo e das culturas agrícolas. Assim, o uso de propriedades magnéticas têm tido destaque no cenário mundial, pois são propriedades inerentes às partículas constituintes dos minerais que compõem o solo, sedimentos e rochas, indicando seu potencial uso como ferramenta pedométrica. A suscetibilidade magnética (SM) do solo, se aplicada para determinada região, tipo de solo ou superfície geomórfica, pode ser utilizada como uma ferramenta pedométrica que facilita a aquisição de informações acerca dos fatores de formação do solo, da própria estimativa dos atributos físicos e químicos, ou ainda das mudanças nas propriedades do solo ocorridas pelas constantes conversões da floresta amazônica para cultivos agrícolas. Para isso, técnicas estatísticas multivariadas e geoestatísticas são fundamentais para avaliar a concentração da SM, sua distribuição e variação espacial nos solos do estado do Amazonas, assim como evidenciar a influência das bactérias na formação de minerais magnéticos *in-situ*. Por isso, medições de SM podem ser incorporadas às tradicionais análises de solo para construção de um banco de dados, para sua posterior calibração como *proxie* ou como modelos baseados em processos ou em simples correlações. Estes modelos podem ser calibrados não só para a aquisição de conhecimento envolva da ciência do solo, como também de inferências para as ciências geológicas e paleoambientais.

PALAVRAS CHAVE: Técnicas Pedométricas, Atributos do Solo, Solos Amazônicos, Propriedades Magnéticas, *Proxies*.

Resumen

La demanda de métodos alternativos de evaluación cualitativa del suelo que ayude en la planificación

agrícola y política y la toma de decisiones ha aumentado en las últimas décadas. El alto costo y el tiempo requerido para los estudios de campo son obstáculos para la obtención de conocimientos en el correcto manejo de suelos y cultivos agrícolas. Así, se ha destacado en el escenario mundial el uso de las propiedades magnéticas, por ser propiedades inherentes a las partículas que componen los minerales que componen el suelo, sedimentos y rocas, lo que indica su potencial uso como herramienta pedométrica. La susceptibilidad magnética del suelo (SM), si se aplica a una región específica, tipo de suelo o superficie geomórfica, se puede utilizar como una herramienta pedométrica que facilita la adquisición de información sobre los factores de formación del suelo, la estimación de atributos físicos y químicos, o incluso los cambios en las propiedades del suelo que ocurrieron debido a la constante conversión de la selva amazónica a cultivos agrícolas. Para ello, las técnicas estadísticas multivariadas y geoestadísticas son fundamentales para evaluar la concentración de MS, su distribución y variación espacial en los suelos de Amazonas, así como para evidenciar la influencia de las bacterias en la formación de minerales magnéticos in-situ. Por ello, las mediciones de SM deben incorporarse a los análisis de suelos tradicionales para la construcción de una base de datos, para su posterior calibración como proxie o como modelos basados en procesos o correlaciones simples. Estos modelos pueden calibrarse, no solo para la adquisición de conocimientos en torno a la ciencia del suelo, sino también para inferencias para las ciencias geológicas y paleoambientales.

PALABRAS CLAVE: Técnicas Pedometria, Atributos del suelo, Suelos amazónicos, Propiedades magnéticas, *Proxies*.

Abstract

The demand for alternative methods of qualitative soil assessment that assist in decision making and agricultural and political planning has grown in recent decades. The high cost and time required for field surveys are obstacles to obtaining knowledge for the correct management of soil and agricultural crops. Thus, the use of magnetic properties has stood out on the world stage, as they are properties inherent to the particles that make up the minerals that make up the soil, sediments and rocks, indicating its potential use as a pedometric tool. Soil Magnetic Susceptibility (MS), if applied to a specific region, soil type or geomorphic surface, can be used as a pedometric tool that facilitates the acquisition of information about soil formation factors, the estimation of physical and chemical attributes, or even changes in soil properties caused by the constant conversions of the Amazon rainforest to agricultural crops. For this, multivariate and geostatistical statistical techniques are essential to assess the concentration of MS, its distribution and spatial variation in the soils of Amazonas, as well as to evidence the influence of bacteria in the formation of magnetic minerals in-situ. For this reason, SM measurements must be incorporated into traditional soil analyzes for the construction of a database, for later calibration as a proxie or as models based on processes or simple correlations. These models can be calibrated not only for the acquisition of knowledge around soil science, but also for inferences for the geological and paleo-environmental sciences.

KEYWORDS: Pedometric Techniques, Soil Attributes, Amazonian Soils, Magnetic Properties, *Proxies*.

1. Introdução

Atualmente, o desenvolvimento de práticas agrícolas intensivas necessitam cada vez mais de estudos do solo com maiores níveis de detalhes, no intuito de auxiliar na tomada de decisão agrícola e política, além de apoiar a produção sustentável (Siqueira et al., 2015). Estudos detalhados que empregam métodos tradicionais demandam amostragem sistemática e/ou grande volume de amostras, análises laboratoriais e

tempo para processar e adquirir resultados. Isto comumente gera resíduos provocados pela utilização de reagentes, resultando em grande desconforto econômico e ambiental (McBratney et al., 2003).

Neste contexto, as propriedades magnéticas dos solos vêm sendo amplamente investigadas nas comunidades de ciência ambiental e geofísica para indicar o desenvolvimento do solo, paleossolos, clima e poluição (Hannam et al., 2009). A assinatura magnética do solo é consequência não apenas do material de origem, propriedades físico-químicas, idade, temperatura, processos biogênicos e pedogênicos, mas também das atividades humanas (Bouhsane & Bouhlassa, 2018). Então, sabendo-se que as medições da susceptibilidade magnética (SM) são bastante sensíveis às variações ambientais, a compreensão da relação entre as propriedades magnéticas com a geoquímica e material de origem do solo nos fornece informações sobre os processos de intemperismo e pedogênese, importantes para o gerenciamento do uso agrícola e ambiental (Camêlo et al., 2018).

As técnicas utilizadas para quantificar os atributos magnéticos do solo incluem, principalmente, a medição da suscetibilidade magnética específica ao volume (κ – adimensional) e de massa (χ – $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$), além de magnetização induzida e remanescente (A/m) (Aidona et al., 2016). A SM trata-se da capacidade de magnetização de um material por um campo magnético indutor. Suas medições são não-orientadas, em massa, e representam a soma das contribuições individuais de todos os minerais magnéticos presentes em uma amostra (Silva et al., 2015).

As medições de SM vêm adquirindo cada vez mais destaque no contexto de aquisição de informações pedológicas e geoquímicas, porque mantém a precisão dos levantamentos sem haver aumento de custo e tempo de análise por ser uma propriedade de fácil aquisição. Por isso, a SM torna-se uma ferramenta pedométrica capaz de determinar e avaliar mudanças no ambiente do solo e seus atributos como *proxies*, por meio de modelos baseados em processos ou como simples correlações, de maneira simples, rápida, sem impacto ambiental e custo relativamente baixo devido sua fácil aplicação (Ramos, 2015).

Além destas vantagens, as medições de SM podem ser feitas em laboratório ou campo de forma segura, rápida e não destrutiva para qualquer tipo de material (Dearing, 1999). Assim, ao passo em que a SM seja usada como ferramenta *proxie* simples, mais investigações serão possíveis em escalas regionais, nacionais e internacionais (Golden et al., 2015). Contudo, os estudos de SM do solo são escassos na região norte do Brasil. Pesquisas adicionais são necessárias para entender os processos que definem a concentração e distribuição da SM do solo.

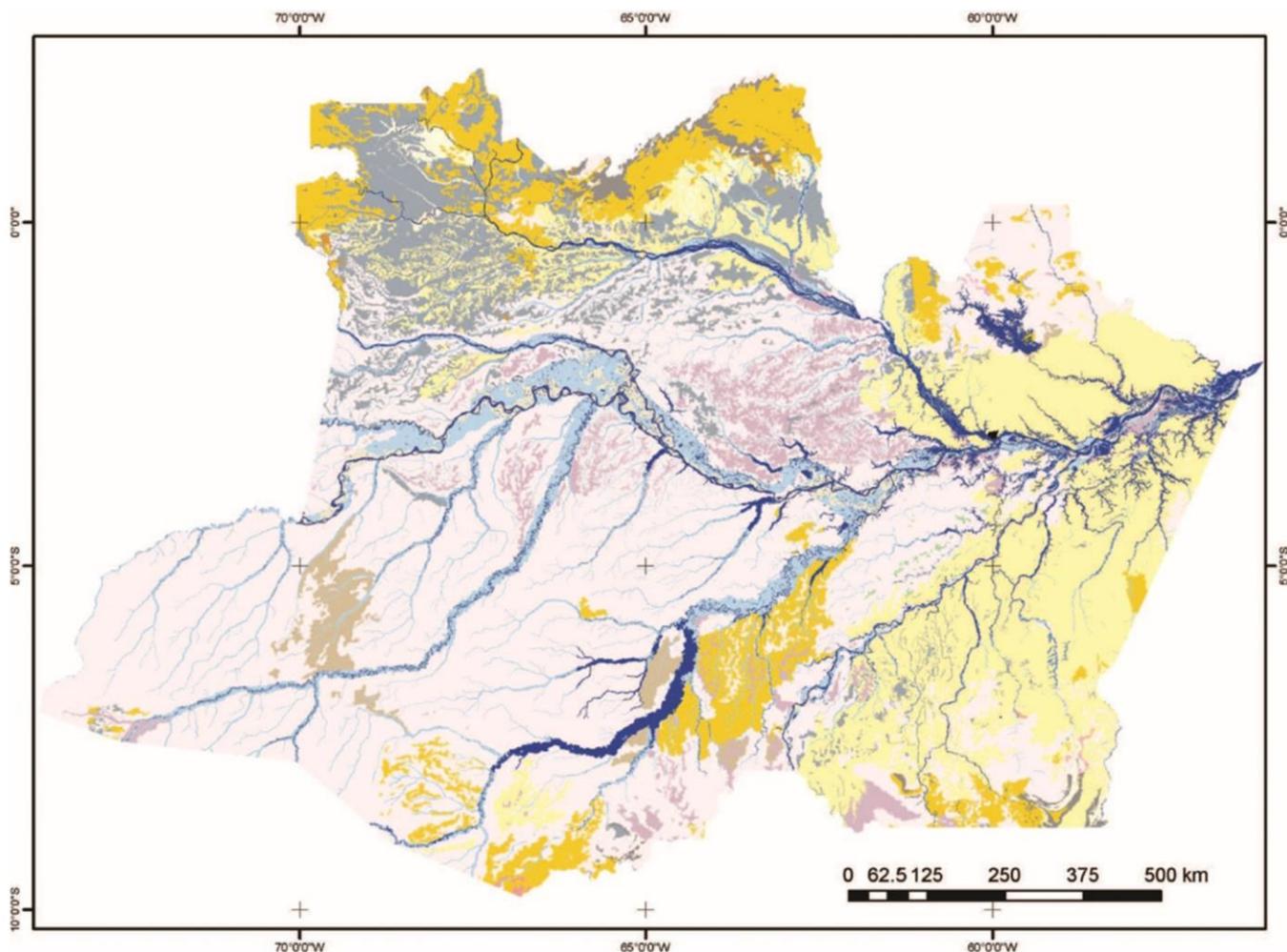
2. Solos do Amazonas

O Amazonas abriga o bioma mais biodiverso existente, de grande importância socioambiental e econômica. Seus solos são pedodiversos, e por isso, convenientemente são divididos em 11 megasetores pedológicos necessários para o estudo dos pedoambientes que se equiparam a uma escala quase continental (Schaefer et al., 2017).

Dentre as classes de solo dominantes no Amazonas, 45% da área está dominada por Argissolos e 26% por Latossolos (Figura 1). Ambos são geralmente distróficos, exceto onde ocorrem rochas máficas, e se concentram nas zonas cristalinas do Cráton amazônico sob terra firme. Gleissolos e Neossolos predominam nas planícies de inundações e perfazem 9% dos solos do Amazonas, sendo em sua quase totalidade férteis quando ocorrem nas margens dos rios de águas barrentas. Em particular, os Gleissolos são dominantes no Baixo Amazonas com atividade de argila alta (Ta). Já os Neossolos predominam em áreas de terras firmes da Vila Amazônia (Parintins) quando são Quartzarênicos, ou estão associados à rios quando Flúvicos (Maia & Marmos, 2010; Schaefer et al., 2017).

Figura 1: Classes de solos do Estado do Amazonas.

Nota: Compilado da base digital do IBGE/SIPAM. Adaptado de Maia & Marmos (2010).



LEGENDA

Afloramentos de rocha e Neossolos Litólicos	Gleissolos Háplicos	Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos
Argissolos Amarelos	Latossolos Amarelos	Planossolos Háplicos
Argissolos Vermelhos	Latossolos Vermelho-Amarelos	Plintossolos Háplicos
Cambissolos Háplicos	Neossolos Flúvicos	Plintossolos Pétricos
Espodossolos	Neossolos Litólicos	Corpos d'água
Gleissolos e Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos e Organossolos		

Os Espodossolos totalizam 7% da área do estado, são característicos da bacia do rio Negro, bem arenosos, profundos, ácidos e pobres quimicamente, além de estarem cobertos geralmente por “campinaranas”. Ainda, são provenientes da destruição de mantos latossólicos ou outros processos de arenização (cólicos fluviais) em clima superúmido. Os Plintossolos, com 3,5%, predominam nos campos e cerrados no sul do estado, principalmente nos municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama. As classes restantes ocorrem em menor proporção no estado, apesar de serem dominantes em certas regiões, como os Cambissolos na região do Alto Solimões e na bacia do rio Urucu (Coari) (Maia & Marmos, 2010; Schaefer et al., 2017). Os solos antrópicos (Terra Preta de índio), característicos por sua elevada fertilidade natural em relação à solos adjacentes, ocorrem frequentemente sobre as Terras Firmes do Médio Amazonas e nas várzeas, nas quais foram mais observadas e estudadas (Campos et al. 2011).

As áreas sob savanas da Amazonia, normalmente estão geralmente associadas a solos mal ou imperfeitamente drenados, entretanto, também podem ocorrer sobre Latossolos Amarelos

subsuperficialmente coesos ou epipedregosos (Monte Alegre), ou arenosos (Alter do Chão) (Schaefer et al., 2017).

Em relação à mineralogia destes solos, principalmente nos Latossolos, há dominância da caulinita, mas também são encontradas pequenas quantidades de gibsita, ilita e quartzo. A caulinita varia de bem cristalizada até o intermediário caulinita/haloisita desordenada, dependendo do tamanho da partícula mineral. Tamanhos de partículas pequenas tendem a agregar conforme elevação dos teores de ferro da fração argila, causando aumento em sua aleatoriedade estrutural (Kitagawa & Möller, 1980; Zenero et al., 2016).

3. Propriedades da suscetibilidade magnética

Na natureza, há inúmeros tipos de rochas formadas sob diferentes condições de pressão, temperatura e na presença ou ausência de água, trazendo consigo um histórico de sua formação. As condições em que as rochas são formadas determinam a composição mineralógica dos minerais que a compõem. Para Dearing (1999), os minerais, por sua vez, são compostos naturais que geralmente estão na forma de cristais. Sua estrutura interna é determinada pelo arranjo de átomos em um padrão tridimensional denominado “treliça”. O comportamento magnético de um mineral é controlado tanto pelos átomos particulares que compõem a treliça quanto pelo modo como a treliça é estruturada. Por isso, átomos de mesmo elementos químicos podem dar origem a diferentes estados magnéticos nos minerais.

A manifestação magnética de qualquer material ocorre devido ao comportamento dos elétrons dos átomos que o compõem, quando estimulado por um campo magnético induzido. Este seu comportamento possui dois aspectos, um de orbitar o átomo, e outro de girar em torno de si próprio. Este segundo aspecto é denominado de “*spin*”. A maneira como os diferentes *spins* dos elétrons são alinhados determina a energia magnética total ou o momento do átomo. Quando há presença de um campo magnético indutor, os *spins* tendem a se alinhar conforme a orientação desse campo. A razão entre o campo magnético externo (indutor) e a magnetização é denominada Suscetibilidade Magnética (SM) (Dearing, 1999).

Dessa maneira, a SM é um parâmetro definido pela razão entre a resposta da indução magnética (M) por um campo magnético aplicado (H). Assim, a suscetibilidade (κ) é definida pela magnetização por unidade de campo ($\kappa = M/H$), sendo referida como SM volumétrica e adimensional. Entretanto, estudos ambientais requerem resultados baseados em massa seca, devido as diferentes densidades de cada material, e por esta razão, normalmente divide-se κ pela densidade aparente (ρ) do material, obtendo-se “ χ ” (SM específica de massa [χ (m^3/kg) = κ / ρ]), a qual é a propriedade mais estudada (Dearing, 1999; Liu et al., 2012).

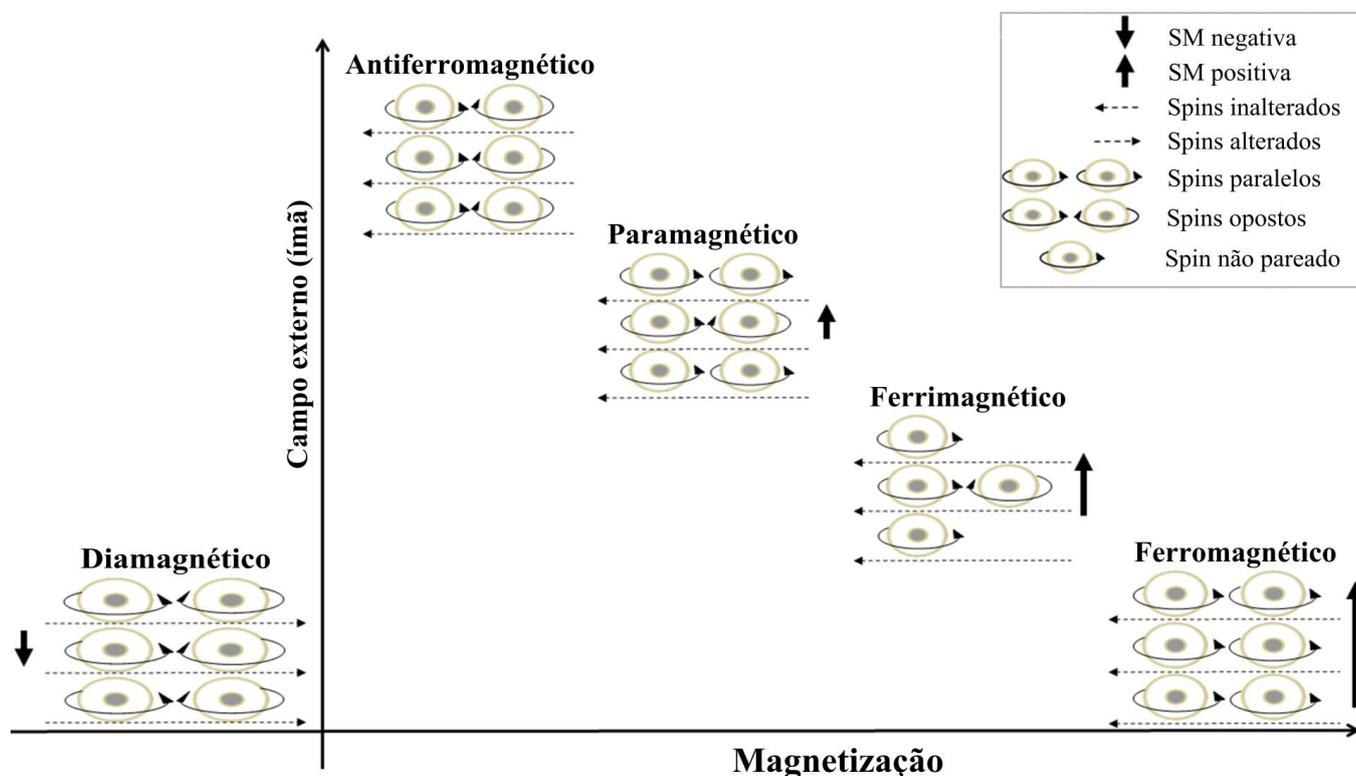
Convencionalmente, os comportamentos dos materiais magnéticos são classificados em cinco formas: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Thompson & Oldfield, 1986). Estes comportamentos ocorrem de acordo com a maneira que os *spins* das celas unitárias que compõem o material se portam frente à aplicação de um campo magnético induzido. Tanto as rochas como os minerais ou sedimentos são assim classificados.

Cada um destes comportamentos magnéticos são parcelas contribuintes da χ , ou seja, dos minerais presentes em um material/amostra que retêm ou não uma magnetização remanente, na ausência de um campo aplicado. Assim, conforme explicita Liu et al. (2012), se minerais retêm uma magnetização remanente forte, então são ferromagnéticos (e.g. magnetita, maghemita) e ferrimagnéticos (e.g. magnetita, pirrotita), se é fraca são antiferromagnéticos (e.g. hematita, goethita), se são “não magnéticos” tratam-se de materiais paramagnéticos (e.g. silicatos, argilas) e diamagnéticos (e.g. quartzo, carbonatos, matéria orgânica, água). Portanto, a χ de um material ambiental é a soma de todas as χ destes componentes (Figura 2).

Apesar de minerais ferromagnéticos apresentarem maior χ , são pouco encontrados na natureza. Por isso, os ferrimagnéticos são os mais importantes dos comportamentos magnéticos. Esta categoria inclui a magnetita e alguns outros minerais contendo ferro com altos valores de χ (Liu et al, 2012). A magnetita, em rochas ígneas, representa cerca de 1-2% dos minerais e pode ser encontrada em quase todos os solos, destacando-se por ser 1.000 vezes mais magnética do que o mineral antiferromagnético ou paramagnético

mais forte, e cerca de 10.000 vezes mais forte que o mineral de argila mais fraco, predominando, assim, na medição da χ onde estão presentes (Dearing, 1999).

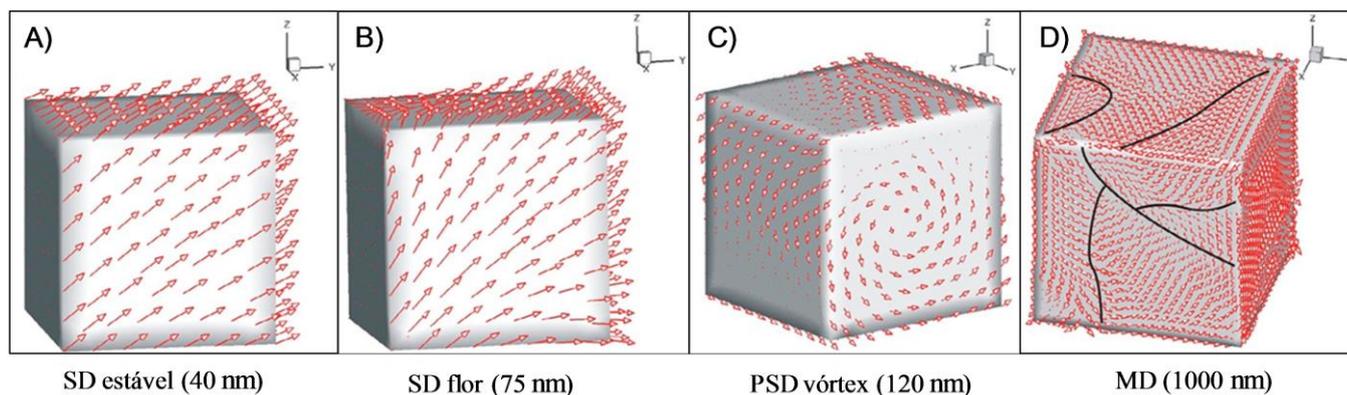
Figura 2: Realinhamento dos *spins* na presença de um campo magnético. Adaptado de Siqueira (2010) e Ramos (2015).



Entretanto, a classe dos minerais ferrimagnéticos são um caso especial devido à saturação da magnetização quando aplicado um grande campo magnético. Tauxe (2010) explica que isto torna a suscetibilidade ferrimagnética (χ_{ferri}) levemente dependente do tamanho do grão, assim como da concentração mineral magnética para minerais fortemente magnéticos (Peters & Dekkers, 2003), devido aos efeitos de estruturas de *spins* complexas que dependem do tamanho e da forma das partículas magnéticas. Por exemplo, em tamanhos maiores do que algumas centenas de nanômetros, cristais de magnetita se dividem em regiões de magnetização uniforme (domínios magnéticos) para reduzir a energia magnética total.

Por este lado, grãos que apresentam domínios magnéticos, conhecidos como grãos de múltiplos domínios (MD), respondem diferentemente aos campos aplicados (Figura 3). Em contraste, grãos de simples domínio (SD) são magneticamente ideais e uniformemente magnetizados e não possuem paredes de domínio. No entanto, na pequena extremidade do espectro de tamanho de grãos SD, há momentos magnéticos fortemente restritos a certas direções dentro do grão, o que limita a χ . Apesar de Heider et al. (1996) encontrarem que a χ é independente do tamanho do grão devido à estresses internos, a magnetização dos menores grãos SD é dominada por flutuações térmicas; seus momentos não são restritos e exibem o denominado comportamento superparamagnético (SP) e têm χ muito mais elevada que os grãos SD comuns (Liu et al., 2012).

Figura 3: Estado micromagnético teórico associado para um cubo de magnetita uniaxial com diferentes tamanhos. Com o aumento de tamanho do grão, os *spins* evoluem de uniaxial (A) para flor (B), para vórtex (C) e para estados de múltiplos domínios (D). Adaptado de Liu et al. (2012).



Os processos ambientais que determinam a presença de grãos grossos e finos podem ser muito diferentes. Por isso se faz necessário a distinção entre SP e MD em estudos magnéticos ambientais. Por exemplo, grãos de tamanho intermediário que são pequenos demais para se separarem em domínios, mas que também são grandes demais para serem uniformemente magnetizados, exibem complexos padrões eletrônicos de *spin*. Um desses padrões é uma parede de domínio conhecida como “vórtex” (Schabes & Bertram, 1988; Williams & Dunlop, 1989) (Figura 3, C), no qual o grão de tamanho intermediário pode se estruturar, ao invés de apresentar dois domínios separados por uma parede de domínio. Outro exemplo clássico está nos grãos pequenos que se espalham em estruturas de “flor” (Figura 3, B), exibindo comportamentos que são transicionais entre os dos verdadeiros grãos de MD e SD, sendo denominados grãos de pseudo-domínio único (PSD) (Williams & Dunlop, 1995).

Segundo Maher (1988), perto do limite de comportamento SP/SD (e.g. ~ 20-25 nm para magnetita) o limiar no qual uma partícula se transforma de SD estável para SP é controlado pelo tempo ao qual pode responder pelo forçamento externo de um campo aplicado e, portanto, depende do tempo e da temperatura. Dessa forma, ao diminuir a temperatura ou o tempo de observação, ocorre mudança de grãos no limite do SP para o estado SD estável (Worm, 1998).

Na prática, isto pode ser visto com o aumento da frequência de observação (e.g. de baixa frequência [$\chi_{bf} = 470$ Hz] para alta frequência [$\chi_{af} = 4700$ Hz], as duas frequências de operação do medidor Bartington Instruments internacionalmente utilizado). De acordo com Till et al. (2011), mudar do SP para o estado SD estável causa uma diminuição acentuada em χ . Portanto, convém a utilização de uma relação entre estas duas faixas de frequência, denominada de χ dependente de frequência absoluta (χ_{fd}), a qual é utilizada para determinar minerais ferrimagnéticos superparamagnéticos ultrafinos (< 0,03 μm) que ocorrem como cristais produzidos majoritariamente por processos bioquímicos no solo (Dearing, 1999). Assim como minerais com comportamento ferrimagnéticos predominam a χ sobre os demais, o ciclo do ferro também está intimamente ligado ao magnetismo ambiental, através de mecanismos químicos, físicos e biológicos. O ciclo do ferro opera em diferentes escalas, incluindo a transformação local ou *in situ* de óxidos de ferro (e.g. magnetita, maghemita, ferrihidrita, goethita, lepidocrocita, sulfetos de ferro, etc., comuns em solos, poeiras e outros sedimentos) com ou sem efeitos de micróbios em diferentes ambientes (Malki et al., 2006).

Nesse contexto, o magnetismo do solo é um eficiente interrogador de mudanças que ocorrem via deposição e/ou alteração química de íons Fe^{2+} ou Fe^{3+} contidos em óxidos de ferro (magnetita, maghemita, hematita), oxihidróxidos de ferro (goethita, ferrihidrita, lepidocrocita), sulfetos de ferro (greigita, pirrotita) ou redes cristalinas de carbonato (siderita) (Liu et al., 2012). Tais mudanças iniciam com a migração de íons Fe de uma rede cristalina (e.g. goethita) para outra (, magnetita), com o potencial de migração reversa quando as condições ambientais se invertem. Por isso que a determinação do tamanho das partículas magnéticas ajuda a identificar cada mudança ambiental. Por exemplo, a redução de ferro origina a neoformação de magnetita ou maghemita no solo superficial como grãos de SP (diâmetro, $d < 20$ nm), os quais têm alta χ (Zhou et al., 1990).

Portanto utilizar medições de χ , e principalmente χ_{bf} , são fundamentais à determinação de minerais ferrimagnéticos no ambiente, pelo fato que seus valores são altamente sensíveis e podem detectar a presença de minerais em níveis de detecção bem abaixo daqueles encontrados na difração de raios-X (DRX) e na espectroscopia Mössbauer (Maher, 1986). Assim, Resende et al. (1988) sugerem a utilização da χ_{bf} como critério de classificação de solos em virtude de sua simplicidade de determinação.

4. Medições da SM (χ) como *proxie*

As causas das fontes de magnetismo no solo são várias e têm sido documentadas de forma ampla na literatura, e bem sumarizadas por Hannam et al. (2009) e Liu et al. (2012). Para adquirir certos critérios de classificações, diferentes técnicas foram desenvolvidas para avaliar a origem dos minerais que influenciam o sinal da χ , incluindo: (1) comparação com outras *proxies* influenciadas por parâmetros paleoambientais; (2) medidas de propriedades magnéticas para obter informações sobre a mineralogia magnética e o tamanho dos grãos; e (3) observação direta dos minerais magnéticos via dissolução (Silva et al., 2015). A partir destas técnicas, pesquisas atuais vêm conseguindo propor novas alternativas de avaliação qualitativa do solo.

A comparação com outras *proxies* paleoambientais permite inferências acerca dos portadores do sinal de χ . Uma correlação positiva entre χ e *proxies* paleo-ambientais independentes é a primeira indicação de que o sinal primário é preservado (Silva et al., 2015), permitindo inferências da origem do sinal da χ e detecção de vários outros parâmetros a depender do estudo. Dentre as mais clássicas *proxies* entre χ e parâmetros paleoambientais pode-se citar: o teor de argila ou quartzo ou resíduos insolúveis em rochas carbonáticas (Mabille & Boulvain, 2008; Hladil et al., 2009), o uso de elementos geoquímicos (Tribovillard et al., 2006; Calvert & Pedersen, 2007), medidas de espectrometria de raios gama (Ehrenberg & Svana, 2001; Kozłowski & Sobien, 2012), reflectância espectral (e.g. Koptíková et al., 2010), e isótopos radioativos (Burton, 2006; Dopieralska et al., 2006).

As medidas de propriedades magnéticas permitem a identificação da natureza, quantidade e tamanho de grão dos principais minerais magnéticos. Entre as mais estudadas pode-se citar: medidas de histereses, como por exemplo, na quantificação de proporções de minerais ferro, para e diamagnéticos (Riquier et al., 2010; Blumentritt, 2015), a curva de aquisição de magnetização remanente isotérmica (IRM) e relação-S (Kruiver et al., 2001; Egli, 2003), e medidas termomagnéticas (Devleeschouwer et al., 2010; Ellwood et al., 2015).

Por último, a observação direta dos indicadores de tamanhos de grãos magnéticos fornece discriminação entre estados de domínios a partir do uso de parâmetros como, por exemplo, a χ_{fd} (Jackson et al., 1993; Font et al., 2005; Aidona et al., 2016), a plotagem de quadratura e coercividade (Devleeschouwer et al., 2015), χ remanescente anespérica (Blumentritt, 2015; Grabowski et al., 2015), entre outras.

A utilização destas diferentes técnicas de medição das propriedades magnéticas aliadas às suas aplicações, seja como uma simples ferramenta de correlação ou como *proxies* vem sendo utilizadas principalmente para mapear a concentração de metais pesados no solo (Hanesch & Scholger, 2002; D'Emilio et al., 2012; Wang et al., 2014; Camargo et al., 2018). No entanto, suas aplicações ganharam notável destaque a partir de 2010, quando passaram a surgir pesquisas em diversos segmentos provando que é possível utilizar a SM para prever a pluviosidade (Balsam et al., 2011), a deposição e detecção de cinzas volante de carvão (Fürst et al., 2010; Cowan et al., 2013), investigar a redução de ferro mediada por micróbios (Mewafy et al., 2011), identificar padrões de redistribuição do solo (Liu et al., 2015), bem como uma ferramenta de pesquisa forense (Pringle et al., 2015), para prever a estabilidade de agregados (Goebel et al., 2017), entre outros.

No Brasil, os trabalhos encontrados utilizando medições de SM visam sua caracterização em diferentes tipos de solos ou estão restritas ao seu uso como função de pedotransferência. Por exemplo, Cortez et al. (2011) mostram através de correlações como a SM pode ser utilizada na identificação de áreas de manejo específicas em citricultura, da mesma maneira como Santos et al. (2011) e Barrios et al. (2012) revelam

como a SM identifica compartimentos e segmentos da paisagem, além do potencial de emissão de CO₂ (Leal et al., 2015). Em outro ponto de vista, Matias et al. (2013) disponibilizaram alguns modelos de SM para caracterização do solo, enquanto Marques Jr et al. (2014) usam a SM para caracterizar a variabilidade espacial de propriedades do solo. Estudos mais recentes já têm demonstrado que a SM também pode ser útil para indicar a qualidade de solos cultivados com cana-de-açúcar (Barrios et al., 2017), diferenciar ambientes do solo (Ramos et al., 2017), e até mesmo para prever fatores de erodibilidade do solo com uma precisão maior que 60% e uma acurácia acima de 85% (Barbosa et al., 2019).

Dessa forma, a validação e uso de *proxies* SM para estudos nos solos do Amazonas consiste de um novo período de levantamento e confecção de um banco de dados que, por iniciar do zero, pode ser considerado de grande escala. No entanto, sabe-se que cada vez mais a expansão e intensificação agrícola com consequente mudança da cobertura primária tem levado à deterioração dos recursos naturais da bacia amazônica (Hartemink et al., 2008; Nascimento et al., 2018). Pesquisas onerosas tem sido feitas para quantificar as mudanças nas propriedades físicas (Souza et al., 2019), químicas (Silva Júnior et al., 2012), hidráulicas (Zimmermann et al., 2006) e na produção de sedimentos (Maeda et al., 2008) que foram ocasionadas pela conversão da floresta para cultivos na região. A insuficiência de pesquisadores locais e baixo investimento na pesquisa são entraves que dificultam ainda mais os levantamentos de alto custo.

Por isso, *proxies* SM ajustadas e validadas podem ser a chave para esse entrave, ao permitir manter a precisão dos estudos sem aumento de custo, com economia de tempo e de treinamento profissional, pois as medições de SM são práticas e rápidas, e principalmente, sem geração de resíduos ao meio ambiente. Esta técnica permitirá, a longo prazo, um rápido e fácil diagnóstico para fazer planejamentos, saber os riscos e quais medidas tomar nas lavouras para o correto manejo das culturas implantadas em qualquer tipo de solo.

Estudos sobre SM nos solos do Amazonas ainda são incipientes, havendo relatos somente para Argissolos na região sul do Amazonas e Terras Pretas de Índio (Oliveira et al., 2015; Söderström et al., 2016; Oliveira et al., 2017; Brito et al., 2021). Ao passo que há demanda de estudos sobre SM, mais se preenche a atual lacuna de informações sobre o entendimento da SM em solos tropicais e a influência de bactérias na formação de minerais *in-situ*, além de fornecer também literatura para otimização da escala de amostragem, predição e heterogeneidade (Hannam et al., 2009).

5. Técnicas de discriminação de pedoambientes

Atualmente, há grande preocupação com a conversão de áreas naturais para implementação de sistemas de exploração agropecuária, haja vista as alterações isoladas de cada manejo e uso do solo para com seus atributos, além dos distúrbios da microbiota do ambiente (Lourente et al., 2011). Por exemplo, em estudo sobre alterações em atributos físicos, químicos e biológicos, Carneiro et al. (2009) verificaram que em áreas de vegetação nativa de Cerrado, convertidas em pastagem ou cultivo de grãos, todos esses atributos do solo são alterados. Ainda, segundo Rocha Júnior et al. (2014), a substituição da cobertura vegetal têm causado mudanças negativas nas propriedades do solo, levando à degradação de grandes áreas e ocasionando um declínio na sua qualidade.

Diante disso, a avaliação conjunta da variação dos atributos é importante para o melhor manejo do solo e das culturas visando à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, haja vista que a simples mensuração e a representação digital de um atributo isolado do solo, como resposta à prática de manejo, geralmente não é eficiente para estabelecer relação causa-efeito com a produtividade de culturas. Portanto, os métodos estatísticos univariados, elevam a dimensão do problema, além de onerar o processo, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Assim, a utilização de análise multivariada, a qual inclui diversos procedimentos estatísticos, torna-se uma alternativa para investigar relações complexas, permitindo indicar diferenças e estabelecer relações entre os tratamentos e os atributos avaliados, tornando-se uma ferramenta importante na análise das informações obtidas (Cherubin et al., 2011; Cunha et al., 2012; Santi et al., 2012).

Em comparação com as séries de medição clássicas restritas a uma única variável, a abordagem multivariada produz uma quantidade maior de informações para caracterização de objetos (Henrion &

Henrion, 2001). A análise multivariada já é bem documentada a nível global, e alguns exemplos de suas muitas aplicações incluem: compressão de dados, processamento de imagens, visualização, análise exploratória de dados, reconhecimento de padrões e previsão de séries temporais (Tipping & Bishop, 1999). Ao longo dos anos esta técnica vêm ganhando reconhecimento e novas aplicações práticas. Por exemplo, em estudo recente sobre sistemas de cultivo hortícolas, Chahal & Van Eerd (2019) demonstram que o uso de técnicas multivariadas também podem ser aplicadas para prever a qualidade do solo, através da seleção de um conjunto de indicadores. Esses indicadores são selecionados com base, geralmente, no uso de PCs (componentes principais) que reduzem a redundância dos dados e explicam a sua variabilidade.

Além das técnicas multivariadas, também existem os métodos de obtenção de dados baseados em sensoriamento remoto, sensoriamento próximo ao solo e em espectroscopia do solo (Minasny & McBratney, 2016), as quais formaram a base do atual conceito que se têm sobre Mapeamento Digital do Solo (MDS). Entre os princípios mais utilizados no contexto do Mapeamento Digital do Solo (MDS), encontram-se a pedometria e a aprendizagem de máquina. A pedometria lida com incertezas em modelos de solos devido à variação determinística ou estocástica, imprecisão e desconhecimento das propriedades e processos do solo (McBratney et al., 2000). Dentre as técnicas mais utilizadas da pedometria em MDS destaca-se aquelas baseadas em classificação numérica, como a lógica *fuzzy* – que para cada entrada de dados mapeiam uma saída esperada; e a técnica *geoestatística* – capaz de evidenciar a relação da paisagem e classes pedológicas (McBratney et al., 2000). Em particular, a geoestatística foi bem aceita no mapeamento de propriedades do solo por cientistas do solo no Brasil, havendo numerosas contribuições para tanto para a área de ciência do solo como para outras áreas multidisciplinares.

A geoestatística possui bases advinda da teoria de variáveis regionalizadas, que considera a variabilidade espacial de uma determinada variável do solo como uma função aleatória, sendo representada por um modelo estocástico (Lima et al., 2013). Nesse contexto, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo se torna importante em áreas sob diferentes cultivos, uma vez que a geoestatística pode indicar alternativas de manejo, principalmente, para estimar respostas das culturas em função de determinadas práticas de manejo (Souza et al., 2001).

Em síntese, um semivariograma experimental é estimado das amostras obtidas e então utilizado no ajuste dos modelos teóricos que sejam funções admissíveis. O semivariograma fornece uma medida do grau de dependência espacial entre amostras em uma direção e pode crescer até um valor constante (patamar) dentro de determinado intervalo, ou então, crescer continuamente sem apresentar evidências de atingir um patamar. Quanto maior a semivariância, mais dissimilares são as propriedades dos solos entre os locais (Carvalho et al., 2010). Entretanto, quando o fenômeno em estudo revela diferentes padrões de dependência espacial, ou seja, apresenta uma variabilidade que não é a mesma em todas as direções, o fenômeno em estudo é chamado de anisotrópico. A anisotropia é ocasionada quando o semivariograma apresenta distintos padrões de dependência espacial em diferentes direções. Sua utilização permite uma maior precisão na construção de mapas temáticos que descrevem a variabilidade espacial dos atributos do solo (Guedes et al., 2013).

Por outro lado, a aprendizagem de máquinas (do inglês – *deep learning*) é um método capaz de aprender a representação de dados por meio de uma série de camadas de processamento, sendo usado principalmente em problemas de classificação de imagens hiperespectrais e multiespectrais (Padarian et al., 2019). Dentre os principais algoritmos de aprendizagem de máquina pode-se citar a floresta aleatória, redes neurais artificiais, máquina vetor de suporte, vizinho mais próximo, o sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo, entre outros. A floresta aleatória (do inglês – *random forest*) ganhou destaque na última década como uma ferramenta de regressão robusta no MDS. Em suma, várias árvores de previsão são construídas com um subconjunto de preditores escolhidos aleatoriamente (Breiman, 2001). Este algoritmo opera um conjunto de árvores de regressão em que cada árvore é treinada em uma amostra *bootstrap* dos dados de treinamento e a previsão é feita pela média das saídas de previsão.

Por outro lado, as redes neurais artificiais tentam construir um modelo matemático que funciona de forma análoga ao cérebro humano, através de um sistema de muitos elementos ou ‘neurônios’ interligados por

canais de comunicação ou ‘conectores’ que geralmente carregam dados numéricos, codificados por diversos meios e organizados em camadas. As redes neurais artificiais têm sido amplamente utilizada em ciência do solo, principalmente para prever atributos do solo na forma de funções de pedotransferência para predição de propriedades do solo (McBratney et al., 2003).

Com o passar dos anos, os algoritmos baseados em *deep learning* foram aprimorados, e cada vez mais novos ramos dos algoritmos foram surgindo. Agora, estas técnicas estão sendo integradas ao estudo de SM do solos de forma nacional e internacional. Ayoubi et al. (2018) e Ayoubi et al. (2019) demonstram que a combinação de análises de regressão linear múltipla com técnicas multivariadas discriminatórias são capazes de discriminar de forma rápida e não destrutiva grupos de solos, a partir dos quais a SM e outras medidas magnéticas podem ser usadas para melhorar a acurácia das predições de concentrações de metais em solos naturais. Por outro lado, Mello et al. (2020) e Brito et al. (2021) utilizam métodos geoestatísticos na avaliação da SM como potencial pedoindicador ambiental, e provam como a SM auxilia a discriminar de grupos de solos que sofreram mudanças na litologia, e como a aplicação de diferentes técnicas geoestatísticas contribuem no mapeamento digital do solo.

De forma análoga, Mendes et al. (2021) elaboraram uma nova estrutura para mapeamento da SM e atributos do solo em profundidade baseada em dados multiespectrais e hiperespectrais do solo. Para isso, os autores investigaram quatro modelos determinísticos (Rede Neural Bayesiana Regularizada, Modelo Linear Generalizado, Floresta Aleatória e Cubista) e alguns modelos híbridos (e.g. Krigagem de Regressão de resíduos do modelo mais ajustado). A partir desta integração foi possível criar uma nova variável ambiental, os quais denominaram de “Melhor Imagem Sintética do Solo (MISS). Com a MISS é possível identificar verticalmente e horizontalmente os principais padrões do solo, o que não tem sido possível se obter com levantamentos tradicionais do solo.

6. Conclusão

O estudo das propriedades magnéticas dos solos tem se desenvolvido bem nas últimas décadas, com aplicações cada vez mais específicas e sofisticadas. Apesar da literatura incipiente que relata seu emprego na região Amazônica, o desenvolvimento de aplicações práticas que empregam o uso de medidas de suscetibilidade magnética abre um leque de possibilidades de obtenção de novas informações dos solos do Amazonas, seja para o conhecimento acerca dos processos de formação ou de outras propriedades do solo. Para o seu emprego como *proxie* ou através de modelos matemáticos, técnicas estatísticas como a geoestatística, técnicas multivariadas, redes neurais artificiais, regressões múltiplas, e floresta aleatória são indispensáveis para que se possa detectar a variabilidade espacial e as mudanças horizontais e verticais nos atributos do solo causadas pela constante transformação de áreas naturais para sistemas de exploração agrícolas no Amazonas.

Referências

- Aidona, E.; Grison, H.; Petrovsky, E. Kazakis, N.; Papadopoulou, L. & Voudouris, K. (2016). Magnetic characteristics and trace elements concentration in soils from Anthemountas River basin (North Greece): Discrimination of different sources of magnetic enhancement. **Environment Earth Sciences** 75(20):1375.
- Ayoubi, S.; Abazari, P. & Zeraatpisheh, M. (2018). Soil great groups discrimination using magnetic susceptibility technique in a semi-arid region, central Iran. **Arabian Journal of Geosciences** 11(20):1–12.
- Ayoubi, S.; Adman, V. & Yousefifard, M. (2019). Use of magnetic susceptibility to assess metals concentration in soils developed on a range of parent materials. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 168:138–145.

- Balsam, W. L.; Ellwood, B. B.; Ji, J.; Williams, E. R.; Long, X. & El Hassani, A. (2011). Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: worldwide data from tropical and temperate climate. **Quaternary Science Reviews** 30(19-20):2732–2744.
- Barbosa, R. S.; Marques Júnior, J.; Barrón, V.; Martins Filho, M. V.; Siqueira, D. S.; Peluco, R. G., ... & Silva, L. S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 78(1):1-12.
- Barrios, M. D. R.; Marques Junior, J.; Matias, S. S. R.; Panosso, A. R.; Siqueira, D. S. & Scala Junior, N. (2017). Magnetic susceptibility as indicator of soil quality in sugarcane fields. **Revista Caatinga** 30(2):287–295.
- Barrios, M. D. R.; Marques Junior, J.; Panosso, A. R.; Siqueira, D. S. & La Scala Junior, N. (2012). Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36(4):1073–1082.
- Blumentritt, D. J. & Lascu, I. (2015). A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA). In: Da Silva, A. C., Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Bouhsane, N. & Bouhlassa, S. (2018). Assessing magnetic susceptibility profiles of Topsoils under different occupations. **International Journal of Geophysics** 2018:1-8.
- Breiman, L. (2001). Random forests. **Machine Learning** 45(1):5–32.
- Brito, W. B. M.; Campos, M. C. C.; Souza, F. G.; Silva, L. S.; Cunha, J. M.; Lima, A. F. L.; ... & Oliveira, I. A. (2021). Spatial patterns of magnetic susceptibility optimized by anisotropic correction in different Alisols in southern Amazonas, Brazil. **Precision Agriculture** 1-31.
- Burton, K. W. 2006. Global weathering variations inferred from marine radiogenic isotope records. **Journal of Geochemical Exploration** 88:262–265.
- Calvert, S. E. & Pedersen, T. F. (2007). Elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and application. In: Claude, H. M. & Anne De, V. (eds) **Developments in Marine Geology** 1:567–644.
- Camargo, L. A.; Marques Jr, J.; Barrón, V.; Alleoni, L. R. F.; Pereira, G. T.; Teixeira, D. D. B. & Souza Bahia, A. S. R. (2018). Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra. **Catena** 165:503–515.
- Camêlo, D. L.; Carlos Ker, J.; Fontes, M. P. F.; Costa, A. C. S.; Corrêa, M. M. & Leopold, M. (2018). Mineralogy, magnetic susceptibility and geochemistry of Fe-rich Oxisols developed from several parent materials. **Scientia Agrícola** 75(5):410-419.
- Campos, M. C. C.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S.; Ribeiro Filho, M. R.; Souza, R. V. C. C.; Almeida, M. C. (2011). Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, 70:598-609.
- Carneiro, M. A. C.; Souza, E. D.; Reis, E. F.; Pereira, H. S. & Azevedo, A. R. (2009). Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:147-157.
- Carvalho, S. R. L.; Vilas Boas, G. S. & Fadigas, F. S. (2010). Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação Barreiras. **Cadernos de Geociências** 7(2):63-79.
- Castellini, M. & Iovino, M. (2019). Pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of Sicilian soils. **Archives of Agronomy and Soil Science** 65(10):1401–1416.

- Chahal, I. & Van Eerd, L. L. (2019). Quantifying soil quality in a horticultural-cover cropping system. **Geoderma** 352:38–48.
- Cherubin, M. R.; Santi, A. L.; Basso, C. J.; Eitelwein, M. T. & Vian, A. L. (2011). Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera** 7(13):196-210.
- Cortez, L. A.; Júnior, J. M.; Peluco, R. G.; Bortoli Teixeira, D. & Siqueira, D. S. (2011). Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Revista Energia na Agricultura** 26(3):60–79.
- Cowan, E. A.; Seramur, K. C. & Hageman, S. J. (2013). Magnetic susceptibility measurements to detect coal fly ash from the Kingston Tennessee spill in Watts Bar Reservoir. **Environmental Pollution** 174:179–188.
- Cunha, E. Q.; Stone, L. F.; Ferreira, E. P. B.; Didonet, A. D. & Moreira, J. A. A. (2012). Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16(1):56–63.
- D’Emilio, M.; Macchiato, M.; Ragosta, M. & Simoniello, T. (2012). A method for the integration of satellite vegetation activities observations and magnetic susceptibility measurements for monitoring heavy metals in soil. *Journal of Hazardous Materials* 241-242:118–126.
- Dearing, J. A. (1999). **Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 system**. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 54p.
- Devleeschouwer, X.; Petitclerc, E.; Spassov, S. & Prétat, A. (2010). The Givetian–Frasnian boundary at Nismes parastratotype (Belgium): the magnetic susceptibility signal controlled by ferromagnetic minerals. In: Silva, A. C. & Boulvain, F. (eds) **Magnetic Susceptibility, Correlations and Paleozoic Environments**. *Geologica Belgica*, 13:351–366.
- Devleeschouwer, X.; Riquier, L.; Babek, O.; De Vleeshouwer, D.; Petitclerc, E.; Sterckx, S. & Spassov, S. (2015). Magnetization carriers of grey to red deepwater limestones in the GSSP of the Givetian–Frasnian boundary (Puech de la Suque, France): signals influenced by moderate diagenetic overprinting. In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Dopieralska, J.; Belka, Z. & Haack, U. (2006). Geochemical decoupling of water masses in the Variscan oceanic system during Late Devonian times. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 240:108–119.
- Egli, R. (2003). Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves. **Journal of Geophysical Research** 108:B2-2081.
- Ehrenberg, S. N. & Svana, T. A. (2001). Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: an example from the Finn mark carbonate platform (Carboniferous–Permian), Barents Sea. **AAPG Bulletin** 85(2):295–308.
- Ellwood, B. B.; El Hassani, A.; Tomkin, J. H. & Bultynck, P. (2015). A climate-driven model and development of a floating-point timescale for the middle devonian Eifelian stage using time-series analysis of magnetic susceptibility (χ) data set. In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – a Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Font, E.; Trindade, R. I. F. & Nédélec, A. (2005). Detrital remagnetization in hematite-bearing Neoproterozoic Puga cap dolostone, Amazon craton: a rock magnetic and SEM study. **Geophysical Journal International** 163:491–500.
- Fürst, C.; Lorz, C.; Zirlwagen, D. & Makeschin, F. (2010). Testing the indicative value of magnetic susceptibility measurements for concluding on site potentials and risks provoked by fly ash deposition. **Environmental Management** 46(6):894–907.

- Goebel, M. O.; Krueger, J.; Fleige, H.; Igel, J.; Horn, R. & Bachmann, J. (2017). Frequency dependence of magnetic susceptibility as a proxy for fine-grained iron minerals and aggregate stability of south Chilean volcanic ash soils. **Catena** 158:46–54.
- Golden, N.; Morrison, L.; Gibson, P. J.; Potito, A. P. & Zhang, C. (2015). Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an urban bonfire site. **Applied Geochemistry** 52:86–96.
- Grabowski, J.; Narkiewicz, M. & De Vleeschouwer, D. (2015). Forcing factors of the magnetic susceptibility signal in lagoonal and subtidal depositional cycles from the Zachełmie section (Eifelian, Holy Cross Mountains, Poland). In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A. & Ribeiro Junior, P. J. (2013). Influence of incorporating geometric anisotropy on the construction of thematic maps of simulated data and chemical attributes of soil. **Chilean Journal of Agricultural Research** 73(4):414–423.
- Hanesch, M. & Scholger, R. (2002). Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. **Environmental Geology** 42(8):857–870.
- Hannam, J. A.; Van Dam, R. L. & Harmon, R. S. (2009). Soil magnetism research: State of the art and future directions. In: **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009**:520–526. Society of Exploration Geophysicists.
- Hartemink, A. E.; Veldkamp, T. & Bai, Z. (2008). Land cover change and soil fertility decline in tropical regions. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 32(3):195–213.
- Heider, F.; Zitzelsberger, A. & Fabian, K. (1996). Magnetic susceptibility and remanent coercive force in grown magnetite crystals from 0.1 mm to 6 mm. **Physical Earth Planetary International** 93:239–256.
- Henrion, R. & Henrion, G. (2001). Chemometrics. In: Günzler, H. & Williams, A. **Handbook of Analytical Techniques**. Wiley-VCH, 37–61.
- Hladil, J.; Koptíková, L.; Galle, A.; Sedláček, V.; Pruner, P.; Schnabl, P.; Langrová, A. et al. (2009). Early Middle Frasnian platform reef strata in the Moravian Karst interpreted as recording the atmospheric dust changes: the key to understanding perturbations in the punctata conodont zone. **Bulletin of Geosciences** 84(1):75–106.
- Isaaks, E. H. & Srivastava R. M. (1989). **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 560p.
- Jackson, M.; Rochette, P.; Fillion, G.; Banerjee, S. & Marvin, J. (1993). Rock magnetism of remagnetized Palaeozoic carbonates: low-temperature behavior and susceptibility characteristics. **Journal of Geophysical Research** 98:6217–6225.
- Kitagawa, Y. & Möller, M. R. F. (1980). Kaolin minerals in the Amazon soils. **Soil Science and Plant Nutrition** 26(2):255–269.
- Koptíková, L.; Bábek, O.; Hladil, J.; Kalvoda, J. & Slavík, L. (2010). Stratigraphic significance and resolution of spectral reflectance logs in Lower Devonian carbonates of the Barrandian area, Czech Republic; a correlation with magnetic susceptibility and gamma-ray logs. **Sedimentary Geology** 225:83–98.
- Kozłowski, W. & Sobien, K. (2012). Mid-Ludfordian coeval carbon isotope, natural gamma ray and magnetic susceptibility excursions in the Mielnik IG-1 borehole (Eastern Poland) – dustiness as a possible link between global climate and the Silurian carbon isotope record. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 339–341:74–97.
- Kruiver, P. P.; Dekkers, M. J. & Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. **Earth and Planetary Science Letters** 189(3–4):269–276.

- Leal, F. T.; França, A. B. C.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. D. B.; Marques Júnior, J. & Scala Júnior, N. L. (2015). Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola** 72(6):535–539.
- Lima, L. D. S.; Neumann, M. B.; Braga, A. D. S. & Roig, H. (2013). **Mapeamento de Solos: do tradicional ao digital**. Embrapa Cerrados-Documentos.
- Liu, L.; Zhang, K.; Zhang, Z. & Qiu, Q. (2015). Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China. **Catena** 129:103–111.
- Liu, Q.; Roberts, A. P.; Larrasoana, J. C.; Banerjee, S. K.; Guyodo, Y.; Tauxe, L. & Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: Principles and applications. **Reviews of Geophysics** 50:4002.
- Lourente, E. R. P.; Mercante, F. M.; Alovisi, A. M. T.; Gomes, C. F. G.; Gasparini, A. S. & Nunes, C. M. (2011). Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 41(1):20-28.
- Mabille, C. & Boulvain, F. (2008). Les Monts de Baileux section: detailed sedimentology and magnetic susceptibility of Hanonet, Trois-Fontaines and Terres d’Hairs Formation (Eifelian/Givetian boundary and Lower Givetian, SW Belgium). **Geologica Belgica** 11:93–121.
- Maeda, E. E.; Formaggio, A. R. & Shimabukuro, Y. E. (2008). Impacts of land use and land cover changes on sediment yield in a Brazilian Amazon drainage basin. **GIScience & Remote Sensing** 45(4):443–453.
- Maher, B. A. (1986). Characterization of soils by mineral magnetic measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors** 42:76-91.
- Maher, B. A. (1988). Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. **Geophysical Journal** 94:83–96.
- Maia, M. A. M. & Marmos, J. L. (2010). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM. 275p.
- Malki, M.; González-Toril, E.; Sanz, J. L.; Gómez, F.; Rodríguez, N. & Amils, R. (2006). Importance of the iron cycle in biohydrometallurgy. **Hydrometallurgy** 83:223–228.
- Marques Jr, J.; Siqueira, D. S.; Camargo, L. A.; Teixeira, D. D. B.; Barrón, V. & Torrent, J. (2014). Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma** 219-220:63–71.
- Matias, S. S. R.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S. & Pereira, G. T. (2013). Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 43(1):93–103.
- McBratney, A. B.; Minasny, B.; Cattle, S. R. & Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma** 109(1-2):41–73.
- McBratney, A. B.; Odeh, I. O. A.; Bishop, T. F. A.; Dunbar, M. S. & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma** 97(3-4):293-327.
- McBratney, A. G.; Santos, M. L. & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. **Geoderma** 117(1-2):3-52.
- Mello, D. C.; Demattê, J. A.; Silvero, N. E.; Di Raimo, L. A.; Poppiel, R. R.; Mello, F. A.; ... & Rizzo, R. (2020). Soil magnetic susceptibility and its relationship with naturally occurring processes and soil attributes in pedosphere, in a tropical environment. **Geoderma** 372:114364.
- Mewafy, F. M.; Atekwana, E. A.; Werkema Jr, D. D.; Slater, L. D.; Ntarlagiannis, D.; Revil, A.; Skold, M. & Delin, G. N. (2011). Magnetic susceptibility as a proxy for investigating microbially mediated iron reduction. **Geophysical Research Letters** 38(21).
- Minasny, B. & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma** 264:301–311.

- Nascimento, C. W. A.; Lima, L. H. V.; Silva, F. L.; Biondi, C. M. & Campos, M. C. C. (2018). Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment** 190(10):606.
- Oliveira, I. A.; Marques Junior, J.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Freitas, L.; Siqueira, D. S. & Cunha, J. M. (2015). Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39(3):668–681.
- Oliveira, I. A.; Marques Júnior, J.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Freitas, L. & Ferraudó, A. S. (2017). Multivariate technique for determination of soil pedoenvironmental indicators in Southern Amazonas. **Acta Scientiarum. Agronomy** 39(1):99–108.
- Padarian, J.; Minasny, B. & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning for digital soil mapping. **Soil** 5(1):79–89.
- Peters, C. & Dekkers, M. J. (2003). Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. **Physics and Chemistry of the Earth** 28(16-19):659–667.
- Pringle, J. K.; Giubertoni, M.; Cassidy, N. J.; Wisniewski, K. D.; Hansen, J. D.; Linford, N. T. & Daniels, R. M. (2015). The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool. **Forensic Science International** 246:31–42.
- Ramos, P. V. (2015). **Suscetibilidade magnética na estimativa de atributos do solo e identificação de compartimentos da paisagem em Latossolos de basalto no planalto do RS** [Dissertação]. Universidade Federal de Santa Maria – RS, 82p.
- Ramos, P. V.; Dalmolin, R. S. D.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Almeida, J. A. D. & Moura-Bueno, J. M. (2017). Magnetic susceptibility of soil to differentiate soil environments in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 41:e0160189.
- Resende, M.; Santana, D. P.; Franzmeier, D. P. & Coey, J. M. D. (1988). Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In **8 International Soil Classification Workshop**. Brasília: Embrapa-SNLCS/USDA-SCS/SMSS, 285p. Part 1: Papers, 78-108.
- Riquier, L.; Averbuch, O.; Devleeschouwer, X. & Tribovillard, N. (2010). Diagenetic v. detrital origin of the magnetic susceptibility variations in some carbonate Frasnian-Famennian boundary sections from Northern Africa and Western Europe: implications for paleo environmental reconstructions. **International Journal of Earth Sciences** 99:57–73.
- Santi, A. L.; Amado, T. J. C.; Cherubin, M. R.; Martin, T. N.; Pires, J. L.; Flora, L. P. D.; & Basso, C. J. (2012). Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa agropecuária brasileira** 47(9):1346-1357.
- Santos, H. L.; Júnior, J. M.; Matias, S. S.; Siqueira, D. S. & Pereira, G. T. (2011). Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 6(4):710–716.
- Schaap, M. G. (2004). Accuracy and uncertainty in PTF predictions. **Developments in Soil Science** 33–43.
- Schabes, M. E. & Bertram, H. N. (1988). Magnetization processes in ferromagnetic cubes. **Journal Applied Physics** 64:1347.
- Schaefer, C. E. G. R.; Lima, H. N.; Teixeira, W. G.; Vale Jr, J. R.; Souza, K. W.; Corrêa, G. R.; Mendonça, B. A. F. et al. (2017). Solos da Região Amazônica. In: Curi N.; Ker, J.C.; Novais, R.F.; Vidal-Torrado, P.; Schaefer, C. E. G. R. (editores). **Pedologia - Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Silva Junior, C. A.; Boechat, C. L. & Carvalho, L. A. (2012). Change in soil fertility in Amazonian forest conversion for different systems in the northern state of Para, Brazil. **Bioscience Journal** 28(4):566–572.

- Silva, A. C.; Whalen, M. T.; Hladil, J.; Chadimova, L.; Chen, D.; Spassov, S.; Boulvain, F. et al. (2015). Magnetic susceptibility application: a window onto ancient environments and climatic variations: foreword. **Geological Society**, Special Publications, 414:1–13.
- Siqueira, D. S. (2010). **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar** [Dissertação]. Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, 75p.
- Siqueira, D. S.; Marques Jr, J.; Pereira, G. T.; Teixeira, D. B.; Vasconcelos, V.; Carvalho Jr, O. A. & Martins, E. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil–landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149–162.
- Söderström, M.; Eriksson, J.; Isendahl, C.; Schaan, D. P.; Stenborg, P.; Rebellato, L. & Piikki, K. (2016). Sensor mapping of Amazonian Dark Earths in deforested croplands. **Geoderma** 281:58–68.
- Sousa Mendes, W.; Dematte, J. A.; Silvero, N. E. Q. & Campos, L. R. (2021). Integration of multispectral and hyperspectral data to map magnetic susceptibility and soil attributes at depth: A novel framework. **Geoderma** 385:114885.
- Souza, F. G.; Campos, M. C. C.; Brito Filho, E. G.; Cunha, J. M.; Lima, A. F. L.; Sales, M. C. G. & Santos, L. A. C. (2019). Physical attributes of soil under amazon forest conversion for different crop systems in southern Amazonas, Brazil. **Canadian Journal of Soil Science** 99(4):563–574.
- Souza, Z. M.; Silva, M. L. S.; Guimarães, G. L.; Campos, D. T. S.; Carvalho, M. P. & Pereira, G. T. (2001). Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25(3):699–707.
- Tauxe, L. (2010). **Essentials of Paleomagnetism**, Univ. of Calif. Press, Berkeley.
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). **Environmental magnetism**.
- Till, J. L.; Jackson, M. J.; Rosenbaum, J. G.; & Solheid, P. (2011). Magnetic properties in an ash flow tuff with continuous grain size variation: A natural reference for magnetic particle granulometry. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems** 12(7):1–10.
- Tipping, M. E. & Bishop, C. M. (1999). Probabilistic principal component analysis. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B** (Statistical Methodology) 61(3):611–622.
- Tribovillard, N.; Algeo, T. J.; Lyons, T. & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. **Chemical Geology** 232:12–32.
- Wang, B.; Xia, D.; Yu, Y.; Jia, J. & Xu, S. (2014). Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China. **Environmental Pollution** 184:335–346.
- Williams, W. & Dunlop, D. J. (1989). Three-dimensional micromagnetic modelling of ferromagnetic domain structure. **Nature** 337:634–637.
- Williams, W. & Dunlop, D. J. (1995). Simulation of magnetic hysteresis in pseudo-single-domain grains of magnetite. **Journal Geophysical Research** 100:3859–3871.
- Worm, H. U. (1998). On the superparamagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. **Geophysical Journal International** 133(1):201–206.
- Zenero, M. D. O.; Silva, L. F. S.; Castilho, S. C. P.; Vidal, A.; Grimaldi, M. & Cooper, M. (2016). Characterization and classification of soils under forest and pasture in an agroextractivist project in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:e0160165.
- Zhou, L. P.; Oldfield, F.; Wintle, A. G.; Robinson, S. G. & Wang, J. T. (1990). Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. **Nature** 346:737–739.
- Zimmermann, B.; Elsenbeer, H. & Moraes, J. M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest ecology and management** 222(1-3):29–38.

Recebido em: 29.04.21

Aceito em: 05.06.22

Endereço para correspondência:

Nome : Milton Cesar Costa Campos

Email: mcesarsolos@gmail.com



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)