

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Aline Moreno Ferreira dos Santos

Engenheira Agrônoma

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Aline Moreno Ferreira dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Prof. Dr. Diego Silva Siqueira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2019

S237c

Santos, Aline Moreno Ferreira dos

Concentrações de hematita e goetita em diferentes cenários de mudanças climáticas / Aline Moreno Ferreira dos Santos. -- Jaboticabal, 2019

92 p. : tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Diego Silva Siqueira

1. Estimativa. 2. Mineralogia. 3. Modelagem. 4. Variáveis ambientais. 5. Óxidos de ferro. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

AUTORA: ALINE MORENO FERREIRA DOS SANTOS

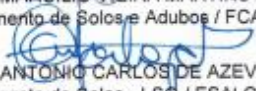
ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

COORDENADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. MÁRCILIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. ANTÔNIO CARLOS DE AZEVEDO
Departamento de Solos - LSC / ESALQ / USP - Piracicaba/SP

Jaboticabal, 31 de julho de 2019

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Aline Moreno Ferreira dos Santos- Filha de Aldo de Jesus Mendes Costa Ferreira e Valdilene Moreno Ferreira, nasceu em Viana, Maranhão, no dia 07 de maio de 1992. Cursou engenharia Agrônômica na Universidade Estadual do Maranhão-UEMA, câmpus Paulo VI, de São Luís-MA, de 2010 a 2016. Foi monitora da disciplina de Fertilidade do solo em 2014, bolsista de iniciação científica pela FAPEMA de 2014-2016, atuando principalmente nos seguintes temas: manejo, potássio, adubação orgânica, agricultura familiar, abacaxi Turiaçu, Fertilidade do Solo. Em 2016 a 2017, foi bolsista de apoio técnico institucional-BATI da Universidade Estadual do Maranhão, trabalhou na prefeitura do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão, como Agrônoma responsável pela manutenção, arborização e paisagismo do Campus Paulo VI, e também bolsista FAPEAD de 2017-2018. Em 2017 foi homenageada pelo governo do Maranhão por meio da FAPEMA por contribuir com a ciência no Maranhão em Honra ao Mérito Científico-Tecnológico e ganhadora do prêmio maisIDH 2017, com o Diploma de reconhecimento pela importante Contribuição nos Campos da Ciência, Tecnologia e Inovação como foco na melhoria dos indicadores de desenvolvimento Humano do Estado do Maranhão, por meio da Secretaria da Ciência, Tecnologia e Inovação-SECTI-MA. Em março de 2018, ingressou no Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. É integrante do grupo de pesquisa: “Group of Agrometeorological Studies” (GAS), da Unesp – Câmpus de Jaboticabal. Em junho de 2018, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação.

DEDICO

A Deus, pela dadiva da vida pois sem ele eu não teria traçado o meu caminho e feito a minha escolha pela Agronomia.

Aos meus pais, Aldo de Jesus Mendes Costa Ferreira e Valdilene Moreno Ferreira pelo apoiado e confiança, mesmo distantes. Ao meu marido e Filho pela companhia nessa jornada.

OFEREÇO

À minha família, pelo incentivo e força nessa caminhada.

À professora Ana Maria Araújo da Silva, por ter acreditado no meu potencial desde 2014, despertando o lado científico das ciências agronômicas através das orientações em projetos de iniciação científica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, pela dádiva da vida pois sem ele eu não teria traçado o meu caminho e feito a minha escolha pela Agronomia.

A minha **família** pelo amor incondicional, especialmente meus pais e minha irmã, acreditando, apoiando e confiando em mim mesmo distantes, ao meus primos Debóra e Gustavo, tias Valdenize, Valquiria e Valtiene e Valmira, a toda a família Andrade Moreno, Costa Ferreira e Barbosa dos Santos.

Ao meu marido e filho, Valter e Samuel pelo amor, companheirismo e amizade, e principalmente por me acompanharem nessa jornada.

Ao meu orientador professor Glauco de Souza Rolim, por sua amizade, dedicação pelos seus ensinamentos que me possibilitou realizar mais essa etapa da minha vida.

Ao meu coorientador Diego Silva Siqueira, pela sua amizade, competência e dedicação ao ensinar.

A professora Dr^a. Ana Maria Silva de Araújo, pelos ensinamentos, amizade, disposição, e paciência, por ter acreditado no meu potencial desde 2014 quando começamos a trabalhar juntas, me despertando o lado científico das ciências agrônômicas através das orientações em projetos de iniciação científica entre os anos de 2014 a 2016.

Aos professores membros da banca de qualificação,

A meus amigos e parceiros científicos, José Reinaldo da Silva Cabral de Moraes, Tayanara Tuany Borges Valeriano, Mary Jane Nunes Carvalho, Kárita Almeida Silva e Paulo Alexandre da Silva.

Ao Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia da Unesp – GAS, pelo recebimento no grupo e pelos conhecimentos compartilhados.

A meus amigos e colegas de departamento, Gustavo André de Araújo Santos, Luiz Fernando Favacho Moraes Filho, Thiago de Andrade Águas, pela disponibilidade em ajudar sempre que foi necessário.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Maria José Servidone Trizólio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Adriana Elisabete Takakura, por me receberem bem no departamento, e pelo carinho.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade em cursar o mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A Todos, Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de Literatura	5
1.2.1 Formação do solo	5
1.2.1.1 Material de origem	6
1.2.1.2 Clima	6
1.2.1.3 Relevo	7
1.2.1.4 Organismo	7
1.2.1.5 Tempo	8
1.2.2 Rochas Basálticas.....	8
1.2.3 Rochas Areníticas	9
1.2.4 Formação de Hematita e Goetita	10
1.2.5 Influência do clima na formação de hematita e goetita	13
1.2.6 Latossolos	15
1.2.7 Argissolos.....	16
1.2.8 Uso de modelos	17
1.2.8.1 Random Forest	18
1.2.9 Mudanças Climáticas	19
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO 2 – CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM DIFERENTES CENÁRIOSDE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	40
Resumo	40
Abstract	41
2.1 Introdução	42
2.2 Material e Métodos	45
2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	45
2.2.2 Metanálise	45

2.2.3 Dados Meteorológicos	49
2.2.4 Análise de dados	49
2.3 Resultados e Discussão	52
2.4 Conclusões.....	63
Referências	64

CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO - Nos solos a goetita e hematita são os principais representantes dos óxidos de ferro, estes minerais necessitam de condições distintas para sua formação, e apresentam influências positivas nas propriedades físicas e químicas do solo. Embora os óxidos de ferro sejam considerados estáveis por longo tempo, estes tem apresentado diferenças no teor em intervalo de tempo menor. Existindo ainda os minerais pedogênicos e litogênicos e sendo a disponibilidade destes minerais fortemente relacionados às condições climáticas. O objetivo deste estudo foi relacionar as concentrações de hematita e goetita com as condições climáticas de 30 anos e gerar concentrações desses óxidos em cenário otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climática, preconizados Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O cenário otimista indica aumento médio da Temperatura em 1°C e redução da precipitação média em 7,5 mm no planeta. O cenário pessimista indica aumento da temperatura em 2°C e aumento da precipitação em 37,8 mm. Foi realizada uma metanálise para prospecção dos teores de hematita e goetita em solos de diferentes regiões do mundo e informações climáticas foram coletados na plataforma NASA-POWER. Os dados dos teores dos óxidos de ferro e climáticos foram relacionados de diversas formas. O modelo de aprendizagem de máquina, Random forest regressor (RF) foi usado para estimar as concentrações de Hm e Gt para o mundo, mapas de distribuição desses minerais foram criados considerando cenário otimista e pessimista de mudanças climáticas. Os resultados mostram que altas precipitações e baixas temperaturas favorecem a formação de Gt, tornando o ambiente mais redutor e que, altas temperaturas e baixas precipitações ocorre uma maior formação de Hm, pois a desidratação da ferrihidrita é acelerada. O cenário otimista de mudanças climáticas indica que irá ocorrer aumento médio de goetita principalmente nos países de clima tropical e subtropical. Enquanto a hematita poderá ocorrer uma redução.

Palavras-chave: estimativa, mineralogia, modelagem, variáveis ambientais

HEMATITA AND GOETHITA CONCENTRATIONS IN DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS

ABSTRACT – In soils, goetite and hematite are the main representatives of iron oxides. These minerals require distinct conditions for their formation, and have positive influences on the physical and chemical properties of the soil. Although iron oxides are considered stable for a long time, they have presented differences in the content in smaller time interval. There are also the pedogenic and lithogenic minerals and the availability of these minerals is strongly related to the climatic conditions. The objective of this study was to correlate hematite and goethite concentrations with the climatic conditions of 30 years and to generate concentrations of these oxides in an optimistic scenario (RCP 2.6) and pessimistic (RCP 8.5) of climatic changes recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The optimistic scenario indicates an average increase of the temperature by 1 ° C and a reduction of the average precipitation by 7.5 mm on the planet. The pessimistic scenario indicates an increase in temperature by 2 ° C and an increase in precipitation by 37.8 mm. A meta-analysis was carried out to prospect the hematite and goethite contents in soils from different regions of the world and climatic information was collected on the NASA-POWER platform. The data of the iron and climatic oxides contents were related in several ways. The machine learning model, Random Forest Regressor (RF) was used to estimate the concentrations of Hm and Gt to the world, distribution maps of these minerals were created considering an optimistic and pessimistic climate change scenario. The results show that high precipitations and low temperatures favor the formation of Gt, making the environment more reductive and that, high temperatures and low precipitations, a higher formation of Hm occurs, since the dehydration of the ferrihydrite is accelerated. The optimistic climate change scenario indicates that average goethite growth will occur, especially in tropical and subtropical countries. While the hematite may occur a reduction.

Keywords: estimation, mineralogy, modeling, environmental variables

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C - Graus Celsius

Al - alumínio (Al)

Ca - Cálcio

Ca - cálcio

DRX - Difractometria de raios

ERD - Espectroscopia de reflectância difusa

Fe - ferro

Fe²⁺ - Íon ferroso

Fe₂O₃ - Hematita

Fe³⁺ - Íons férrico

G kg⁻¹ - gramas/ quilogramas

Gt - Goetita – (FeO(OH))

ha - Hectare

Hm - Hematita

IA - Inteligência Artificial

K - Potássio

LA - Latossolo Amarelo

Lat – Latitude

LB - Latossolo Bruno

LE - Latossolo Vermelho-Escuro

LF - Latossolo Ferrífero

Long - Longitude

LR - Latossolo Roxo LR

LU - Latossolo Variação Uma

LV - Latossolo Vermelho-Amarelo

Mg - Magnésio

mm - Milímetro

MRLS - Modelo de regressão linear simples

ML - Machine learning

Na - Na

NASA / POWER - NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources

P - Fósforo

P - Precipitação

PCA - Principal Component Analysis

R² - Coeficiente de determinação

RMSE - Raiz quadrada do erro-médio (RMSE - Root Mean Square Error)

RF- Random forest

S - Enxofre

Si - Silício (Si)

SM - Suscetibilidade magnética

T – Temperatura do ar

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 (Capítulo 1) – Esquema dos processos pedogenéticos mostrando relações entre fatores, processos de formação do solo e suas propriedades. Fonte: adaptado de Schroeder (1984)	6
Figura 2 (Capítulo 1) - Esquema da alteração do mineral piroxênio, rico em oxigênio, ferro, sílica e cálcio. Com a hidrólise, seus cátions são liberados. O ferro ferroso (Fe^{2+}) é oxidado para formar o mineral secundário goethita, enquanto a sílica e a alumina se recombina para formar o argilomineral caulinita. Parte da sílica e do cálcio são lixiviados. Fonte: Lepsch (2010)	12
Figura 3 (Capítulo 1) - Cenário do aumento da temperatura da superfície da Terra no final 12. Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 21	
Figura 1. (Capítulo 2) - Localização dos trabalhos usados na metanálise.....	45
Figura 2 (Capítulo 2) - Análise de componentes principais com variáveis. Hematita e goetita, Precipitação e temperatura do ar referentes a solos de basálticos e de arenito. PC1 = componentes primários 1 e PC2 = Componentes primários 2.....	52
Figura 3 (Capítulo 2) - Modelos lineares simples entre as concentrações de goetita e hematita a partir de dados regionais médios de 30 anos de precipitação (mm) e temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$). As áreas pintadas correspondem ao intervalo de confiança a 95% de probabilidade. As linhas tracejadas indicam o modelo médio entre solos areníticos e basálticos. As linhas marrons indicam solos basálticos, as linhas azuis os solos areníticos.	53
Figura 4 (Capítulo 2) - Goetita e Hematita relacionado à variação de temperatura do ar e precipitação em 50 localidades no mundo. A: Goetita no	

basalto; B: Goetita no arenito; C: Hematita no basalto; D: Hematita no arenito. 57

Figura 5 (Capítulo 2) Cenário climático atual e distribuição e goetita..... 59

Figura 6 (Capítulo 2) Cenário climático otimista de distribuição e goetita 59

Figura 7 (Capítulo 2) Cenário climático pessimista de distribuição e goetita.. 60

Figura 8 (Capítulo 2) Cenário climático atual e distribuição de hematita..... 60

Figura 9 (Capítulo 2) Cenário climático otimista e distribuição de hematita ... 60

Figura 10 (Capítulo 2) Cenário climático pessimista e distribuição de hematita..... 61

Figura 11 (Capítulo 2) Boxplot da distribuição de Goetita para a condição atual, e cenários otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas..... 61

Figura 12 (Capítulo 2) Boxplot da distribuição de Hematita para a condição atual, e cenários otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas..... 62

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 (Capítulo 2) - Países estudados, com a prospecção das concentrações de hematita (g kg^{-1}) e Goetita (g kg^{-1}) e identificação dos autores dos respectivos artigos, usados para a metanálise.	47
---	----

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

Sabe-se que os óxidos de ferro têm ligação com o potencial produtivo em regiões agrícolas em todo o mundo. Os óxidos e oxihidróxidos de ferro constituem os principais minerais encontrados no solo, sendo hematita (Fe_2O_3) e goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$), os mais comuns (POGGENBURG et al., 2018). As concentrações de hematita (Hm) e goetita (Gt) estão diretamente relacionadas ao clima. A disponibilidade de água nos solos, relacionada com a quantidade média de chuvas, promove a concentração de ácidos húmicos, favorecendo a formação de Gt. Enquanto a Hm é restrita a solos em climas mais quentes, predominantemente subtropicais e tropicais (TORRENT; GUZMAN, 1982; SCHWERTMANN; KÄMPF, 1985).

Os óxidos de ferro hematita e goetita (minerais secundários ou pedogênicos) são formados durante o intemperismo dos minerais primários (litogênicos) (HANKE et al., 2015). Os minerais pedogênicos são encontrados facilmente na fração argila do solo, enquanto os litogênicos que são aqueles que permanecem no solo sem alteração estrutural como se encontravam na rocha, estes ocorrem na fração mais grosseira do solo (areia e silte), que sobre ação de intemperismo ao longo do tempo, são dissolvidos e liberam Fe para o solo (CORNEILL; SCHWERTMANN, 2003).

Usualmente, os óxidos de Fe apresentam elevada superfície específica, resultando em alto poder de adsorção de ânions, além de uma riqueza em micronutrientes e ação cimentante, certificando esse grupo de minerais uma grande importância agrícola (COELHO; VIDAL-TORRADO, 2003; ANUNCIATO MOTA et al., 2007).

A geração de cenários de mudanças climáticas e seu impacto na concentração de óxidos de ferro é uma importante ferramenta para o entendimento e estabelecimento de estratégias mundiais com relação à sustentabilidade dos solos agrícolas.

Os solos são considerados sistemas abertos, complexos e dinâmicos, caracterizados como um ambiente natural fundamental, responsável pela sustentação da vida vegetal, desenvolvimento de animais, microrganismos,

interação humana, além de ser um importante recurso natural (RIEDEL et al., 2018; FANG et al., 2018).

O processo de formação dos solos é conhecido como pedogênese, ocorrendo principalmente a partir da ação do intemperismo, podendo ser químico ou físico (FINK et al., 2019), entretanto, sabe-se que a variabilidade das condições climáticas exerce papel fundamental neste processo (VALENCIA et al., 2018).

A composição mineralógica do solo, depende do material de origem e do grau de intemperização a que foi submetido (ROSSEL; MCGLYNN; MCBRATNEY, 2006).

Os minerais Hm e Gt dão uma cor forte ao solo mesmo que presentes em pequenas quantidades. A goetita confere a cor amarela ao solo, enquanto que a hematita é responsável pela cor vermelha. As concentrações de óxidos de ferro no solo geralmente variam de 1 a 500 g kg⁻¹ (SINGH et al., 2018). Os teores de Hm e Gt nos solos estão intimamente associadas ao potencial produtivo dos cultivos agrícolas, uma vez, que apresentam grande influência nas propriedades químicas e físicas do solo (SANTOS et al., 2019).

Em climas tropicais, as rochas básicas constituem-se como matéria prima para origem destes minerais, estes podem se apresentar com estruturas cristalinas definidas ou como materiais amorfos, e influenciando de forma significativa nas características químicas e físicas do solo, além de apresentar uma relação importante com a estruturação e agregação do solo, conferindo-lhes características desejáveis (TREMOCOLDI, 2003; NONAKA et al., 2017).

Conhecer as concentrações de óxidos de ferro possibilita uma melhor separação das classes de solos no terceiro nível categórico (SANTOS et al., 2013). Solos hipoférricos são aqueles com baixos teores, menores que 80 g kg⁻¹ de solo, os mesoférricos com teores variando de 80 a 180 g kg⁻¹ (INDA JUNIOR, 2018), os férricos com altos teores de óxidos de ferro, entre 180 g kg⁻¹ a 360 g kg⁻¹ e os perférricos com teores de óxidos de ferro muito alto, maiores do que 360 g kg⁻¹ de solo (SANTOS et al., 2013).

A identificação e a quantificação dos óxidos de ferro no solo, geralmente é feita com uso de técnicas laboratoriais de difratometria de raios-X (DRX) (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996), espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000), pelo método indireto de suscetibilidade

magnética (SM) (TORRENT; BARRON, 1993; BARRÓN et al., 2000), e por meio de ferramentas de sensoriamento remoto (ALMEIDA, 2012).

Com base nestas técnicas, autores apresentam estudos da ocorrência destes minerais nas mais diversas partes do mundo. Ramarosan et al. (2018) investigaram o uso de espectroscopia de refletância no infravermelho próximo (NIRS), para estimar a composição mineralógica (hematita e goetita), em solos altamente intemperizados de Madagascar. Cunha et al. (2019) investigou a mineralogia do solo em duas microbacias do bioma Mata Atlântica, Brasil, usando na determinação do teor de óxido de ferro a análise de difração de raio X, Barbosa et al. (2019), estudou o uso da suscetibilidade magnética como variável preditora de fatores de erodibilidade do solo, buscando mapear de forma detalhada latossolos com diferentes teores de ferro, no nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

Os estudos de Taylor e Graley (1967) e Schwertmann et al. (1982), segundo Kämpf e Schwertmann (1983), são os únicos que fazem uma relação entre as concentrações de Gt e Hm com o clima.

Os primeiros trabalhos com inteligência artificial (IA) surgiram na década de 40 e se tornaram em uma nova revolução na modelagem em ciência nos dias de hoje, devido à disponibilidade de computadores para a realização dos cálculos. A chegada da IA na área agrícola é recente. Dahikar e Rode (2014) usaram técnicas de IA para realizar previsão de produtividade e estimar o status de nitrogênio em agricultura de precisão. Chlingaryan et al. (2018) realizaram a predição de rendimentos de cultivos. Dar et al. (2016) utilizaram IA para detectar e preencher áreas vazias de contêineres de commodities agrícolas.

Os modelos de IA permitem avaliações, previsões, classificações e auxílio nas tomadas de decisões (BHARTI et al., 2018). Portanto, algumas técnicas de Machine Learning vêm sendo aplicada (KING, 2017) como redes neurais artificiais, árvore de decisão, classificação Naive bayes.

Dentre estas técnicas cita-se o Random forest (RF), um modelo robusto, que apresenta um bom desempenho para pequenas amostras (LUCAS, 2011). O RF, consiste em criar e ajustar árvores de decisões em várias subamostras do conjunto de dados (CHEN et al., 2017). Uma das vantagens deste é a rapidez para treinar e prever, dependendo apenas de um ou dois parâmetros de ajuste (CUTLER; CUTLER; STEVENS, 2012). Este modelo já foi utilizado por Shah et

al. (2018) para fazer previsão de produção de culturas; Nabiollahi et al. (2019) avaliou o estoque de carbono orgânico do solo sob cenários de mudanças do uso da terra, já Pouladi et al. (2019) fez mapeamento do conteúdo de matéria orgânica do solo.

O setor agrícola é afetado diretamente pela alteração das mudanças climáticas (CHALLINOR et al., 2014; ROSENZWEIG et al., 2014). A fim de alcançar metas ambiciosas de mitigação do clima, as emissões de CO₂ e as emissões de gases do efeito estufa (GEE) precisam ser reduzidas substancialmente (VAN MEIJL et al., 2018). Impactos adversos das mudanças climáticas na produtividade dos cultivos já foram evidenciados em todo o mundo, e também na economia dos países (MOORE e LOBELL, 2015). No entanto, poucos trabalhos fazem uma relação das mudanças climáticas com as características dos solos, principalmente o efeito sobre a mineralogia do solo.

Portanto, os objetivos deste estudo são: relacionar a concentração de hematita e goetita, em solos de várias regiões do mundo, com as condições climáticas médias de 30 anos de dados de temperatura do ar e pluviometria, gerar também concentrações desses óxidos em cenário otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas preconizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Formação do solo

O solo é compreendido como um recurso natural e que tem um papel essencial na manutenção da vida. Nele encontramos os mais diversos tipos de minerais além dele servir como suporte para o desenvolvimento de plantas (VITAL et al., 2018).

A formação do solo ocorre a partir da ação do intemperismo das rochas, o que faz com que sua distribuição regional esteja condicionada às variações climáticas, topográficas e litológicas, bem como aos processos de transporte, sedimentação e evolução pedogênicas (GONÇALVES et al., 2018).

Os processos gerais de formação que ocorrem no solo podem ser entendidos a partir de quatro principais ações (Figura 1): 1) a adição, onde tudo que entra em um corpo de solo vindo de seu exterior, como água, matéria orgânica, poeiras; 2) as transformações acontecem quando componentes do solo são alterados quimicamente ou fisicamente, ocorrendo no interior do corpo do solo, como os minerais e resíduos orgânicos; 3) as remoções referem-se as perdas que ocorrem tanto na superfície como no exterior do solo e 4) a translocação que compreende deslocamento, selecionamento ou mescla dentro ou sobre o solo, levando em maior ou menor distinção dos horizontes do solo (LEPSCH, 2016).

É importante admitir o solo não apenas como o resultado da decomposição de rochas, mas também o produto da interação entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e a biosfera (YU; HUNT, 2018). Estudos levaram ao reconhecimento de cinco grandes fatores de formação do solo (Figura 1), sendo eles o material de origem, clima, relevo, organismo vivo e tempo (KALEV; TOOR, 2018). O autor afirma ainda, que um solo em condições ótimas contém aproximadamente 45% de minerais, 5% de matéria orgânica, 25 % de água e 25% do espaço poroso ocupados por ar.

Um fator importante de formação do solo é o tempo, pois é o período em que a rocha fica exposta as condições ambientais, determinando a maturidade do mesmo (RIBEIRO et al., 2018).

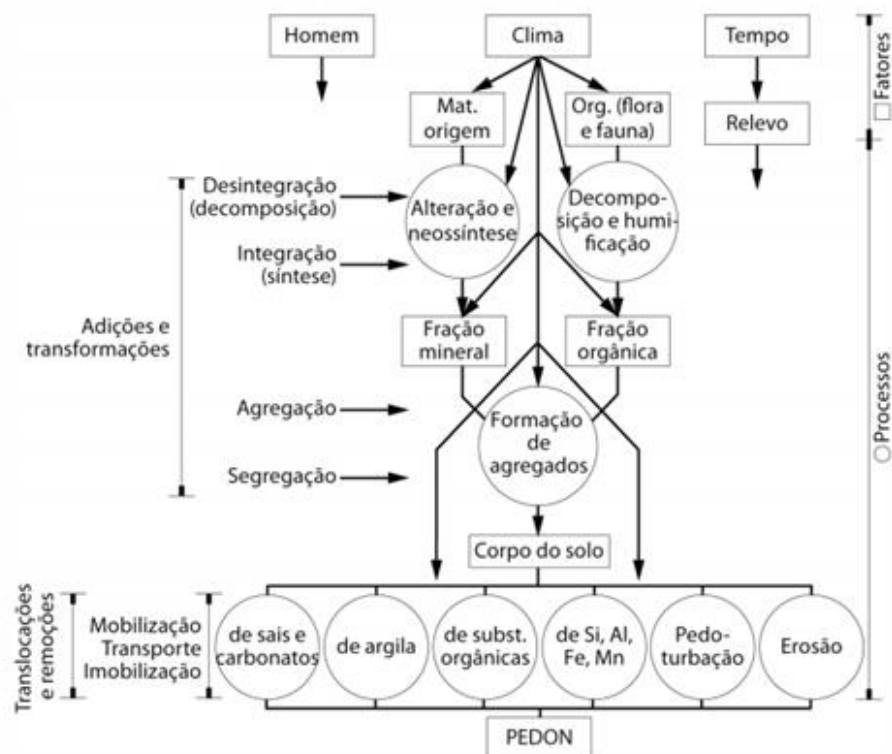


Figura 1. Esquema dos processos pedogenéticos mostrando relações entre fatores, processos de formação do solo e suas propriedades. Fonte: adaptado de Schroeder (1984).

1.2.1.1 Material de origem

Com as denominações iniciais rocha-mãe e material parental, o material de origem carrega a suposição de que obrigatoriamente o substrato alterado é que propicia diretamente a formação do solo, mediante seus produtos liberados em associação aos do meio biológico (ESPINDOLA, 2017).

1.2.1.2 Clima

O clima influencia o desenvolvimento do solo por meio de diferenças nas médias anuais, sazonais e extremas de temperatura e umidade (KHORMALI; TOOMANIAN, 2018).

É o clima que determina a intensidade e o tipo de intemperismo que ocorre no material pai. Os dois principais componentes da influência climática são a

precipitação e a temperatura. Ambas afetam a formação do solo em um ambiente físico, químico e biológico (KALEV; TOOR, 2018). Segundo os autores a precipitação é necessária, devido a importância da água para que ocorra todas as principais reações químicas durante o processo de intemperismo, o aumento da temperatura dobra as taxas de reação da formação do solo, a temperatura combinada com precipitação abundante e lixiviação, o intemperismo e o crescimento das plantas são maximizados. Em regiões onde o clima é mais quente os processos de formação do solo são mais acelerados, pois o calor acelera as reações (PAUSTIAN et al., 2016). Por este motivo os solos formados em climas tropicais são mais intemperizados, enquanto os de regiões de clima temperado são bem menos intemperizados (COWARD et al., 2017).

1.2.1.3 Relevo

Este é um dos principais fatores de formação do solo, muitos autores consideram o relevo como um elemento expressivo na delimitação de unidades de paisagem (NOBREGA; EDÉZIO, 2011).

Algumas regiões podem apresentar relevo de forma mais acentuada, com uma declividade significativa, nestas condições os solos apresentam pouca profundidade e baixo desenvolvimento, visto que em áreas íngremes ao um maior escoamento da água da chuva, com gradual redução da infiltração, refletindo na diminuição da ocorrência do intemperismo (LYBRAND, 2018).

No entanto, regiões mais planas são favorecidas pela ação dos agentes exógenos de transformação do ambiente, e assim contribuem para acelerar a pedogênese (KALEV; TOOR, 2018).

1.2.1.4 Organismos

O processo de formação do solo está intimamente ligado a presença de organismos vivos, visto que muitos destes agem naquilo que conhecemos como intemperismo biológico ou químico, por meio da liberação de diferentes substâncias (MERGELOV et al., 2018).

Portanto, quanto maior o material orgânico e os seres vivos existentes no solo (fungos, bactérias, algas), mais intensificado é o seu processo de constituição. Os organismos fazem-se presente na decomposição das rochas,

alteram os compostos vegetais ou mineralógicos do solo, interferindo em outras instâncias, como o grau de fertilidade e a composição química (EREN, 2017).

1.2.1.5 Tempo

Refere-se ao período em que a rocha mãe foi exposta as condições ambientais. É necessário um determinado tempo para atuação dos processos que levam a sua formação, que depende do tipo de rocha, clima e relevo (GRUNWALD, 2016).

Com as rochas mais fáceis de serem intemperizadas, os solos formam-se mais rápido, enquanto que rochas cujo material de origem é de difícil alteração (quartzo), os solos demoram mais tempo para se formarem (REPE; SIMONČIČ; VRŠČAJ, 2017).

1.2.2 Rochas Basálticas

O basalto é uma rocha, a origem da sua formação está ligada a solidificação do magma (GROTZINGER; JORDAN, 2013). Suas características principais incluem ser uma rocha básica, máfica, maciça, ocasionalmente vesicular e amigdalóide, nesta rocha é naturalmente encontrada minerais de olivina, piroxênio, anfibólio e plagioclásios, estas têm sua formação a partir do resfriamento do magma, onde os elementos químicos ligam-se e estabilizam, formando então minerais que farão parte da composição da rocha (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2010; GROTZINGER; JORDAN, 2010).

As rochas basálticas têm seu início a partir do resfriamento dos derrames contínuos de lavas basálticas (COLEMAN; GREGORY; BROWN, 2016), que ocasionalmente correu a muitos anos atrás, proveniente da fusão entre o material pré-existente em zonas profundas ou abaixo da crosta terrestre, que em um exato momento subiu à superfície terrestre por meio de fraturas, levando aos derrames vulcânicos (HICKEY-VARGAS et al., 2016).

Os solos derivados de rochas basálticas em condições subtropicais e tropicais, podem ocasionar no surgimento de solos argilosos, estes são descritos por conter caulinita e sesquióxido os principais constituintes das argilas, e classificados como Oxisols, Alfisols e Ultisols (MARKUS e at., 2008; HE et al., 2016), além de alto conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro, originados da

decomposição de minerais primários ferro-magnesianos (olivinas, piroxênios e anfibólios) (TREMOCOLDI, 2003).

Estes solos apresentam uma profundidade efetiva e uma cor marrom-avermelhada escura e (NSOR, 2008), a ocorrência destes geralmente se dá em regiões montanhosas, com alta intemperização, com dominância de hematita e goethita (OLIM et al., 2019).

É devido à origem magmática, à quantidade de nutrientes minerais encontrados em materiais vulcânicos e aos processos de formação destes solos, que geralmente possuem boa fertilidade natural, apresentando elevado potencial produtivo (NOORDIN et al., 2017).

Os basaltos cobrem uma área terrestre de mais de $6,8 \times 10^6$ km², ou aproximadamente 5% da área terrestre global (DESSERT et al., 2003; VASYUKOVA et al., 2018).

Na literatura é possível encontrar relatos da ocorrência de rochas basálticas nas mais diversas partes do mundo. Kim et al. (2019) comentou sobre a ocorrência de basalto na Ilha de Jeju, na Coreia do Sul, Yan et al (2017) reportou a presença desta na Tailândia, Zhou et al. (2015) mencionou em Ngaiur em Bridle Creek (Austrália) e Cunha et al. (2005) evidenciam em Jaboticabal, Brasil.

1.2.3 Rochas Areníticas

O arenito é considerado uma rocha sedimentar, geralmente são encontradas em ambientes como rios, praias, desertos e dunas litorâneas (BERNET, 2019). As rochas areníticas são formadas principalmente na superfície terrestre, em baixas pressões e temperaturas, cobrindo aproximadamente 75% da crosta terrestre (AZEVEDO, 2018).

As rochas sedimentares são compreendidas como o resultado do estabelecimento de sedimentos, ou seja, fruto da desintegração, decomposição e do transporte de rochas preexistentes, devido a ação do intemperismo, da precipitação química, ou, ainda, de ação biogênica. Constituem uma camada relativamente fina (aproximadamente 0,8 km, em média, de espessura) da crosta terrestre, que recobre as rochas ígneas, magmáticas, metamórficas ou sedimentares. Os folhelhos, arenitos e calcários, nesta ordem, constituem perto de 95% das rochas sedimentares (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

As formações destas rochas ocorrem a partir dos fenômenos que constituem o ciclo sedimentar, destacando-se o intemperismo, erosão, transporte, deposição, soterramento e diagênese/litificação (CHIOSSI, 2013).

O intemperismo é o processo pelo qual as rochas se decompõem ou fragmentam dando origem a sedimentos, podendo este ser de caráter físico ou químico (SALVATORE et al., 2019). A erosão é responsável pelo deslocamento das partículas que resultam do intemperismo, distanciando-as da rocha original (GROTZINGER; JORDAN, 2013; OLIVEIRA et al., 2016). O transporte ocorre quando as partículas sedimentares são deslocadas para áreas de acumulação, quando o agente transportador perde a intensidade, ocorre a deposição ou sedimentação das partículas sedimentares em áreas de acumulação, dando em seguida início ao processo de soterramento, quando sequências de camadas de sedimentos se acumulam, ocorrendo compactação das sucessivas camadas e pôr fim a diagênese que consiste na adaptação às diferentes condições físicas (temperatura e pressão) e químicas (pH, pressão de água), que transforma sedimentos em rochas sedimentares (AZEVEDO, 2018).

Estas rochas apresentam características físico-químicas que estão expressas na sua composição mineralógica, constituídas a partir de materiais inorgânicos, como o quartzo (SiO_2), para rochas areníticas (SUGUIO, 2003).

A mineralogia de um arenito é retratada pelas condições de transporte e, físicoquímicas predominantes nos paleoambientes deposicional e diagenético. Os arenitos são resultado da mistura de minerais e fragmentos líticos, provenientes do intemperismo e erosão de vários tipos de rochas (TEIXEIRA, 2017).

Os minerais detríticos que compõem os arenitos são minerais de sílica, feldspatos, grupo das micas, clorita, argilominerais, minerais pesados, além de fragmentos líticos (TEIXEIRA, 2017). Os minerais químicos, que se formam após sedimentação, são carbonatos, sílica autigênica, sulfatos e sulfetos (OKADA, 1971), sendo o quartzo o mineral mais comum nos arenitos.

1.2.4 Formação de Hematita e Goetita

A cor do solo é considerada uma das características morfológicas mais importantes, pois permite fazer deduções lógicas sobre os atributos físicos,

químicos, biológicos e mineralógicos do solo. Os solos podem se apresentar sob variadas cores, indo do claro ao mais escuro, indicando a presença de quartzo, matéria orgânica e ferro (VITAL et al., 2018).

A Goetita, presente em quase todos os tipos de solos e regiões climáticas, responde pela coloração amarelada e amarronzada nos solos. Possui alta superfície específica e também alto grau de substituição isomórfica em sua estrutura, principalmente por Al. A Hematita (Fe_2O_3), apesar de estar presente em menores quantidades que a Goetita, apresenta alto poder pigmentante, e uma amostra de solo com teor superior a 1,7% já impregna o solo de vermelho. Concentrações de 1%, desse mineral bem dispersas, tornam solos amarelados em solos vermelhos (SCHEFFER et al., 1958; TREMOCOLDI, 2003).

A hematita e goetita apresentam uma forte relação com a estruturação e agregação dos solos, inferindo-lhes características desejáveis, como uma maior absorção de água, melhor infiltração e controle de erosão (SILVA, 2016).

A formação dos óxidos e hidróxidos de ferro, hematita e goetita ocorre durante o intemperismo dos minerais primários, a presença de minerais menos resistentes como os litogênicos possuem íons de Fe^{2+} em sua estrutura cristalina, exemplos são as olivinas, anfibólios e biotita, estes são dissolvidos ocorrendo então o rompimento da rede cristalina desses minerais, reduzindo os íons de Fe^{2+} , sendo disponibilizada no solo na forma de Fe^{3+} (SCHWERTMANN, 1985).

É possível que no solo o íon Fe^{+3} oxidado volte a combinar com outras espécies químicas, levando a neoformação dos minerais secundários (pedogênicos), porém os íons de ferro podem recorrer a vários destinos, este é determinado pelas condições de ambiente, como pH, matéria orgânica, temperatura, umidade, precipitação e a forma como se encontra a oxidação do ferro (SILVA, 2016).

O íon Fe^{+3} pode voltar a se recombinar com o oxigênio, e assim formar grupos chamados de óxidos, hidróxidos ou oxidróxidos, ou seja, os óxidos de ferro, os quais são estáveis em solos intemperizados (SCHULZE, 1984).

A unidade estrutural básica dos óxidos de ferro, está associada à disposição octaedral, na qual a cada átomo de ferro é circundado por seis de oxigênios e hidroxilas, sendo assim os óxidos se diferenciam pelo tipo de arranjo octaedral (RESENDE et al., 2005).

A identificação de óxidos de ferro é realizada a partir de técnicas de difração de raios-RX, sendo esta uma das técnicas mais empregadas. Estes minerais apresentam tamanhos pequenos, fazendo com muitas das vezes necessitem de técnicas mais sofisticadas na sua identificação como a difração de RX (RESENDE et al., 2005).

Lepsch (2016) descreveu o processo de formação dos óxidos de ferro da seguinte forma, sendo minerais de ortossilicato, olivina e silicatos em cadeias (piroxênios e anfibólios), onde ocorre a hidrólise levando a remoção do ferro ferroso que liga os tetraedros, resultando na substituição do silício pelo alumínio. Esse processo causa; dismantelamento completo dos tetraedros, depois do ferro ser removido (que no mineral está presente na forma de íon ferroso Fe^{2+}), este pode passar por processos de oxidação, transformando-se em íons férricos, compondo os óxidos de ferro.

O íon ferroso perde elétrons (Fe^{2+}) transformando-se em íon férrico (Fe^{3+}), que combina-se facilmente com oxigênio e água, formando óxidos de ferro (hematita) e oxi-hidróxidos (goetita), segundo (LEPSCH,2016), (Figura 2).

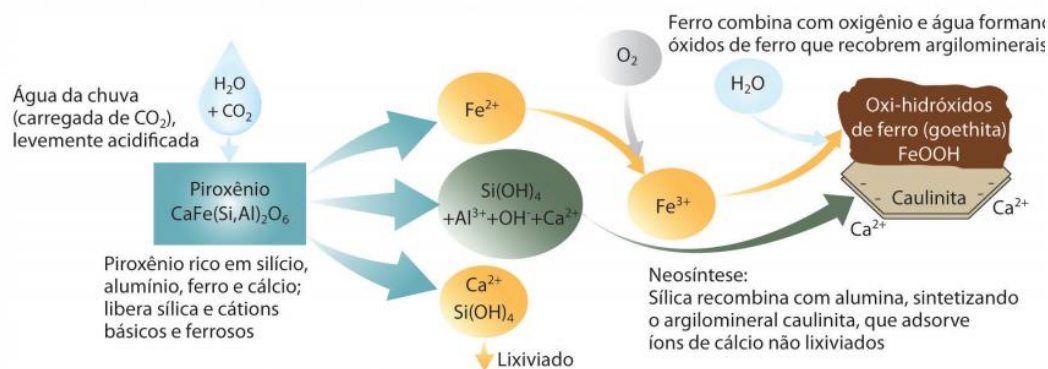


Figura 2. Esquema da alteração do mineral piroxênio, rico em oxigênio, ferro, sílica e cálcio. Coma hidrólise, seus cátions são liberados. O ferro ferroso (Fe^{2+}) é oxidado para formar o mineral secundário goethita, enquanto a sílica e a alumina se recombina para formar o argilomineral caulinita. Parte da sílica e do cálcio são lixiviados. Fonte: Lepsch (2016).

Na literatura autores estudam a ocorrência de hematita e goetita nas mais diversas localidades do mundo, Formenti et al. (2014) relataram presença de Hm e Gt em Minnesota (EUA), Lu et al (2017) comenta da ocorrência desses minerais em desertos da China, Vingiani et al. (2018) mostraram que esses óxidos estão presentes nos solos de Cesárea, Leuca, e Corigliano na Itália e Mahmoudi et al. (2018) comentaram sobre estes em solos no Irã.

As localidades mais ricas em Hematita reportadas na literatura encontram-se na Ilha de Elba-Itália; São Gotardo, Brasil; Suíça, Lava del Vesúvio; Cleator Moor, Cumberland, Inglaterra e Minas Gerais, Brasil (KLEIN e HURLBUT, 1996).

A goetita caracteriza-se como um mineral cosmopolita, podendo ser encontrado facilmente na Europa (Alemanha, Boêmia, República Tcheca; e na Cornualha, Inglaterra), nos grandes depósitos de lateritas no distrito de Mayari e Moa em Cuba. Nos Estados Unidos é comum em amostras em Negaunee, próximo a Marquette, Michigan, também ao longo das montanhas do Apalaches do Oeste de Massachusetts até ao sul do Alabama (KLEIN e DUTROW, 2009).

Segundo Kämpf e Curi (2000), estes minerais são muito comuns em solos tropicais, principalmente na América do Sul.

1.2.5 Influência do clima na formação de hematita e goetita

A presença dos óxidos e hidróxidos de ferro hematita e goethita está presente nos solos e sedimentos das mais diversas zonas climáticas (SCHWERTMANN, 1988; CORNELL; SCHWERTMANN, 2003; Liu 2012). Estes óxidos são os mais abundantes em ambientes naturais (JIANG et al, 2016).

A ocorrência destes minerais no solo está condicionada a vários fatores, entre eles a temperatura, precipitação, pH, umidade, a presença de outros íons no sistema como o alumínio (Al) e silício (GALVEZ; BARRON; TORRENT, 1999; Guo; Barnard, 2013; RATIÉ., 2019).

O clima como fator de interferência na mineralogia do solo tem sido observado nas mais diversas regiões do mundo, geralmente temperaturas médias, menor evapotranspiração, condições úmidas e altas precipitações favorecem a formação da goetita (BALSAM, 1995). Os solos desenvolvidos a

partir de rochas com baixo teor de ferro são as que mais formam esse mineral, como exemplo os arenitos.

Soluções ácidas ou alcalinas a temperaturas $< \sim 80^{\circ}\text{C}$ (SCHWERTMANN; CORNELL, 2000), ou seja, uma solução alcalina com pH elevado favorece a formação de goethita (TORRENT; GUZMÁN, 1982; VINDEDAHL et al., 2016). Enquanto que a hematita é favorecida em condições quentes e secas e baixa precipitação (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1983; FINK et al., 2016).

Já os solos ricos em ferro são os preferidos da hematita, como o basalto, além de pH neutro e temperaturas $> \sim 90^{\circ}\text{C}$ (SCHWERTMANN, CORNELL, 2000), e o aumento do teor de Al induzem a formação de hematita (TORRENT; GUZMÁN, 1982).

Geralmente estes minerais desenvolvem-se como partículas muito finas, na fração de tamanho de argila de solos (TILL; NOWACZYK, 2018). A goetita é particularmente dispersa nos solos, pode ser encontrada em poeira, lago e sedimentos marinhos e é a fase de óxido de Fe dominante em muitos solos em zonas temperadas, enquanto a hematita é mais prevalente em solos de baixa latitude (SCHWERTMANN; CORNELL, 2007).

A liberação de ferro é favorecida pela união de elevadas temperaturas e baixos teores de matéria orgânica ou a acelerada decomposição da matéria orgânica, não sendo complexado e sim precipitado na forma de ferrihidrita, a qual é considerada o precursor da hematita. Assim a temperatura alta faz com que seja rápida a desidratação da ferrihidrita, formando então hematita.

A goetita ocorre em condições opostas, a dissolução e precipitação desse mineral é devido à combinação temperaturas baixas e elevados teores de matéria orgânica, ocorre que o ferro Fe permanece mais tempo complexado na matéria orgânica e a baixa temperatura anula a formação de ferrihidrita (SILVA, 2016).

No entanto, na literatura é possível encontrar relatos da ocorrência destes minerais em diferentes ambientes, Lafon et al. (2004) encontrou óxidos de ferro na poeira do noroeste da China, com uma abundância de goetita de 73% da massa total de óxido de ferro, sendo superior a hematita (27 %). Já Reynolds et al. (2014) encontrou na poeira, coletadas no oeste dos EUA, quantidades iguais de hematita e goetita. Formenti et al. (2014), descreveram que a poeira mineral

na África Ocidental apresentou uma abundância maior de goetita em relação a hematita. No Brasil, mais precisamente no estado do Paraná, Resende et al. (1987) citaram a presença de hematita em solos de origem arenítica pertencentes a formação Caiuá, confirmando que a disponibilidade destes óxidos está associada a fatores do ambiente.

1.2.6 Latossolos

O conceito inicial de latossolo foi descrito por Kellog (1949), descrevendo estes solos como altamente intemperizados e sujeitos a lixiviações intensas, além de baixas atividades de argilas, capacidade de troca de cátions.

Segundo a Embrapa (2013), estes solos, são destituídos de minerais primários ou secundários. São normalmente muito profundos e raramente inferiores a 100 cm e sua cor depende da natureza, forma e quantidade dos constituintes minerais, normalmente óxidos e hidróxidos de ferro, geralmente apresentam coloração homogênea com matrizes avermelhadas ou amareladas.

São solos muito espessos (Horizontes A + B) com pouca diferenciação entre horizontes (VOLLAND-TUDURI et al., 2005). Esse recurso é refletido na mineralogia simples, que compreende basicamente caulinita (1: 1 argila mineral), ferro (Fe) e alumínio (Al) óxidos em diferentes frações de argila e quartzo e outros minerais altamente resistentes na fração grossa (CURI; FRANZMEIER 1984).

Outras características pedogênicas relacionadas aos latossolos são coesão e natureza ácida. A coesão é uma característica típica dos horizontes subsuperficiais, que são muito duros quando seco, tornando-se friável ou sólido quando úmido. Esta característica ocorre devido a sílica e as bases trocáveis (Ca, Mg e K), que são removidas do sistema e levam ao enriquecimento do solo com óxidos de ferro e alumínio, sendo estes agentes agregantes, dando à massa do solo aspecto maciço poroso, com estruturas granulares muito pequenas (EMBRAPA, 2013).

Sua característica ácida é caracterizada pela presença de um horizonte B latossólico (Bw) de baixa retenção catiônica, além de ser oxidado, uma vez que já foi submetido à fase caulínica (SANTOS et al., 2013).

Os latossolos apresentam capacidade de troca de cátions e saturação por base muito baixa, e os minerais mais facilmente intemperizados, a fração

silte geralmente é ausente ou muito baixa, a fração areia predomina o quartzo e na argila a caulinita revestida de óxidos de ferro e alumínio, estes solos desenvolvem-se em condições de ambientes tropicais quentes e úmidos, os latossolos eutróficos, desenvolvidos em regiões mais frias, apresentam alta saturação por bases, pois geralmente são desenvolvidos a partir de rochas básicas, como o basalto (Lepsch, 2016).

Os latossolos são os principais solos sob uso agrícola (KER, 1997). No sistema americano (Soil Taxonomy) compreendem esses solos a ordem dos oxisols. No Brasil, são reconhecidos sete tipos de latossolos (CAMARGO; KLAMT; KAUFFMAN, 1987), sendo eles o Latossolo Ferrífero (LF), Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Bruno (LB), e Latossolo Variação Uma (LU).

Em solos do Rio Grande do Sul, Brasil, Linck (2018) relatou a ocorrência de valores baixos de saturação por base em todos os horizontes (média de 16,7 e 6 %, A, B e BC/CB), o autor ressalta que este resultado indica que o complexo de troca de cátions do solo não está saturado pelos cátions de reações básicas, como, o, K, Ca, Mg e Na. Sendo assim, esses resultados estão associados a lixiviação dessas substâncias, conferindo acidez aos solos intemperizados, como os latossolos.

1.2.7 Argissolos

Estes solos são caracterizados por apresentar profundidade média a alta, com drenagem moderada e a presença de um horizonte B textural, com acúmulo de argila (horizonte diagnóstico que caracteriza a classe de solo), estes apresentam cores vermelhas a amarelas e textura argilosa, ficando abaixo de um horizonte A ou E, onde as cores são mais claras e textura arenosa ou média, além de baixos teores de matéria orgânica (EMBRAPA, 2010). Além disso, o B textural geralmente apresenta argila de atividade baixa ou, raramente, alta se conjugada com a saturação por alumínio também alta (LEPSCH, 2016).

O desenvolvimento desses solos se dá a partir de diversos materiais de origem, podendo ser em áreas de relevo plano a montanhoso. Uma das principais características destes solos é a presença de um incremento no teor de argila, com ou sem decréscimo, do horizonte B (horizonte de máxima iluviação ou de máxima expressão das características do horizonte B), para baixo do perfil.

Há também uma transição entre horizontes A e B de forma clara, abrupta ou gradual (EMBRAPA, 2010).

Os argissolos, em outros países, recebem nomes, como lixisols, acrisols e alisols (FAO/UNESCO e WRD); ultisols e alfisols (Soil Taxonomy); sols ferralitiques (França) e red yellow podzolic soils (antiga classificação dos EUA), (LEPSCH, 2016).

No Brasil, esses solos constituem a segunda ordem mais extensa, podendo apresentar alta ou baixa saturação por bases, serem rasos ou muito profundos, arenosos ou argissolos em superfície, podendo a textura ser gradual ou abrupta, boa parte destes solos são interessantes para a agricultura, principalmente quando eutróficos (LEPSCH, 2016).

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os argissolos são classificados em cinco subordens, os Bruno-Acizentados, Acizentados, Amarelos, Vermelhos e Vermelhos-Amarelos (LEPSCH, 2016).

1.2.8 Uso de modelos

Um modelo é uma representação matemática de algum fenômeno ou conjunto de fenômenos (sistema), com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes problemas. Ao se construir um modelo, faz-se uma tentativa de ganho de conhecimento sobre determinado fenômeno que ainda não seja completamente entendido (MANZIONE et al., 2018).

Na agricultura destacam-se os modelos de previsão de safras, amplamente disputados pelos mercados futuros de commodities agrícolas como soja, café, milho; modelos de crescimento de culturas, modelos de propagação de pragas e doenças, condições de plantio, operações de pulverização, aplicação de lâmina de irrigação, entre outros, passando desde o planejamento agrícola até a tomada de decisões nas rotinas cotidianas (MANZIONE et al., 2018). Segundo Rosenzweig et al (2014) os modelos são também utilizados para analisar os impactos da mudança climática na agricultura de modo geral.

Na literatura é possível encontrar inúmeros trabalhos utilizando a modelagem na agricultura, como o de Wade et al. (2018) que objetivou elucidar o efeito interativo de cultivos de cobertura recentemente incorporados, frações

de ferro pedogênico do solo, clima e propriedades físico-químicas do solo nas taxas de mineralização de N em uma faixa de solos agrícolas da Califórnia.

Farina et al. (2018) avaliaram o modelo Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) em sistemas de cultivo de sequeiro no Mediterrâneo, baseados principalmente no cultivo de trigo para a produção de semolina. Como também a adaptação do cultivo de trigo em resposta às mudanças climáticas em termos de produtividade, sequestro de carbono orgânico (SOC) e emissões de gases de efeito estufa (GEE).

A agricultura está entrando em uma nova fase, onde a geração de dados e informações é constante, por tanto, o uso de algoritmos computacionais se faz necessário para avaliação, previsão e auxílio na tomada de decisão (HAN et al., 2018). Nos últimos anos o uso da inteligência artificial beneficiou inúmeras áreas (medicina, agronegócio, veterinária), e a agricultura vem investindo cada vez mais nesta tecnologia (PATRÍCIO; RIEDER, 2018).

O aprendizado de máquina (Machine Learning, ML) é uma subárea da inteligência artificial, a qual os algoritmos aprendem de forma automática a estimar, classificar, selecionar melhores modelos e reduzir dimensionalidade de problemas, auxiliando na tomada de decisão de vários problemas (LIAKOS et al., 2018).

Diferentes técnicas de ML vêm sendo utilizadas nos últimos anos na agricultura (MISHRA; MISHRA; SANTRA, 2016; KING, 2017). Crane-Droesch (2018) usou redes neurais para prever produtividade, mostrando os impactos negativos das mudanças climáticas na produção de milho no Centro-Oeste dos EUA. Hengl (2017) avaliou a precisão da versão mais recente do sistema SoilGrids, com resolução de 250 m, por meio de modelos ensemble. Zeraatpisheh (2019) usou os modelos, Cubista, Floresta Aleatória e Árvore de Regressão, para fazer uma previsão espacial das principais propriedades do solo (carbono orgânico, teor de argila), na região central do Irã.

1.2.8.1 Random Forest

O método de Florestas Aleatórias (Random Forest, RF) é muito utilizado, pois generaliza problemas de forma eficaz normalmente evitando problemas de overfitting quando comparados com outros modelos de ML (LOUPPE, 2014; WOZNICKI et al., 2019).

O RF é um modelo robusto. Ele é um meta-estimador que ajusta várias árvores de decisão em várias subamostras do conjunto de dados escolhendo a árvore com maior acurácia (LOUPPE, 2014; JANITZA; TUTZ; BOULESTEIX, 2016).

O RF é atraente porque lida naturalmente com a regressão e a classificação, é rápida de treinar e prever, depende apenas de um ou dois parâmetros de ajuste, apresenta uma estimativa interna do erro generalizado, pode ser usado diretamente para problemas de alta dimensão (CUTLER; CUTLER; STEVENS, 2012). Além da capacidade de bom desempenho em pequenas amostras (LUCAS, 2011). Os métodos de ML estão se tornando cada vez mais usuais em ciências. Apesar de conhecida a relação entre o clima e solo, a literatura não disponibiliza nenhum estudo que usa técnicas de ML para explicar a relação entre a mineralogia do solo e o clima.

1.2.9 Mudanças Climáticas

O sistema produtivo agrícola é a atividade econômica que mais depende das condições meteorológicas (MOREIRA et al., 2016), afetando o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de plantas. A planta durante seu ciclo responde diretamente as condições meteorológicas, tal que a combinação destes fatores apresenta efeitos que variam desde os favoráveis até os mais desfavoráveis (ROMANI et al., 2016).

Entre os múltiplos impactos das mudanças climáticas, uma preocupação constante é o potencial de ameaça a produção global de alimentos (SCHLEUSSNER et al., 2018). Resultados de estudos já evidenciaram, impactos adversos das mudanças climáticas na produtividade dos cultivos em todo o mundo. No entanto, (MOORE e LOBELL, 2015) ressaltam que as mudanças climáticas podem ser benéficas para agricultura, dependendo da região geográfica, porém, para áreas de menor latitude, a mudança climática é projetada para resultar em aumento da temperatura, redução das chuvas e aumento da frequência de condições meteorológicas extremas eventos como inundações e secas (MAKUVARO et al., 2018).

Por outro lado, dados indicam que as produtividades de muitos cultivos já diminuíram consideravelmente em todo o mundo. Lobell, Schlenker, Costa-Roberts (2011), citaram que o aumento das temperaturas, diminuiu a produção

global do milho, em 3,8% -12,5% nas últimas três décadas. Os efeitos negativos das mudanças climáticas na produção agrícola provavelmente serão ainda mais severos no futuro, já que deverá ter um aumento de 4°C nas temperaturas globais antes do final deste século (IPCC, 2014 ; ROGELJ et al., 2016). No entanto, Zhang et al (2019) citaram que o clima futuro terá efeitos positivos sobre a produção de arroz no nordeste da planície Chinesa.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), órgão das Nações Unidas, que fornece avaliações regulares da base científica das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, e opções para adaptação e mitigação, afirmou que o aumento da temperatura na terra é causado pela ação antrópica (IPCC, 2014; TOL, 2016).

Algumas atividades humanas propiciaram emitir quantidades significativas de gases de efeito estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO₂), intensificando significativamente o efeito estufa, de acordo com a Global Climate Change (2018). A concentração de CO₂ equivalente na atmosfera, registrada no ano de 2018, foi próxima de 409 ppm.

Conforme previsões realizadas pelo IPCC (2007), no período de 1980 a 1999, se a emissão de gases do efeito estufa continuar de forma tão acelerada, no final do século 21, poderá ocorrer o aumento de até 7,4°C na temperatura em alguns locais do planeta (SILVA, 2018) (Figura 3).

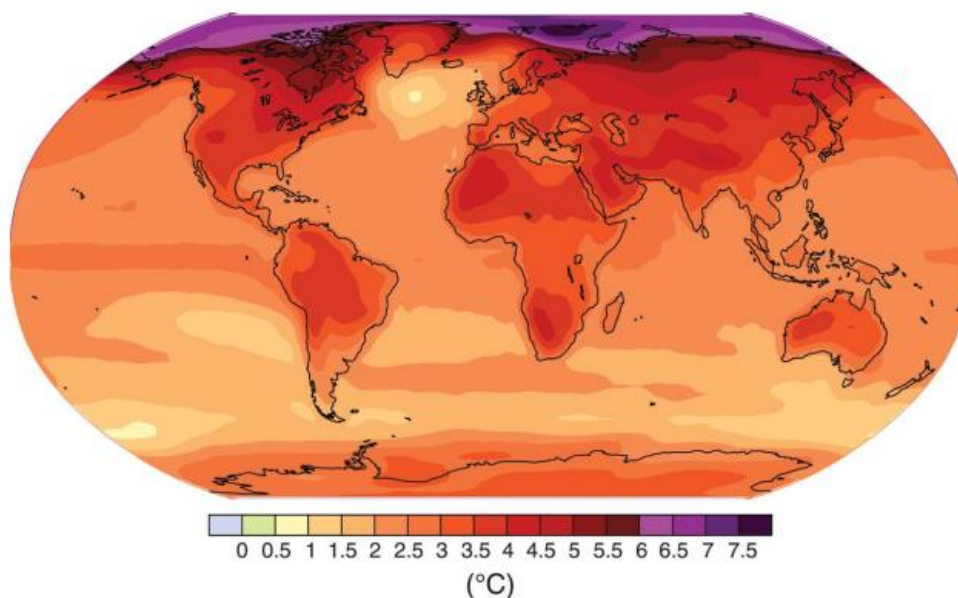


Figura 3 - Cenário do aumento da temperatura da superfície da Terra no final do século 21. Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/graphics/syr/spm6.jpg>>. Acesso em: 06 de jun. 2019.

Os modelos globais de clima (GCM) possuem a capacidade de quantificar, com certa precisão, o efeito de mudanças climáticas sobre determinada região, considerando os modelos da quinta fase do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) (CRUZ, 2017). O IPCC em seu quinto relatório (AR5) criou quatro projeções diferentes, mostrando o que ocorreria com o planeta em cenários diferentes (otimista ao pessimista), para o final do século 21. Cenários estes conhecidos como RCP (Caminhos Representativos de Concentração), determinados a partir do número de reflexão de radiação, conforme a mudança no comportamento antrópico até o ano de 2100.

Para realizar as projeções, os cenários consideram o histórico da evolução de fatores, como emissão de gases, concentração de gases do efeito estufa e características do tipo de cobertura terrestre. A escala de projeção vai de 2.6 (cenário otimista) a 8.5 (cenário pessimista).

O RCP 2.6: O crescimento da radiação atingiria seu pico no meio do século e depois recuaria, com pico dos gases de efeito estufa entre os anos de 2010 e 2020. Nessas condições haveria aumento médio da temperatura de 1,7°C.

O RCP 8.5: É o mais preocupante, pois considera a crescente emissão de gases até o final do século, e neste cenário o aumento no valor de radiação seria quatro vezes maior. Esta situação impactaria num aumento da temperatura em 4,8°C. tanto no cenário 2.6 e 8.5 a precipitação deve variar de acordo com a região.

REFERÊNCIAS

Almeida CDS (2012) **Espacialização e quantificação de sesquióxidos de ferro (Goethita e Hematita) em solos tropicais por meio de sensoriamento remoto hiperespectral**. Dissertação (em Geociências Aplicadas) – UNB, Brasília.

Anunciato Mota JC, Assis Júnior RN, Amaro Filho J, Espindola Romero R, Bastos Mota FO, Libardi PL (2007) Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na chapada do Apodi-RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.

Azevedo MB (2018) **Ancoragem em rocha: avaliação da adesão entre nata de cimento e rochas sedimentares em ensaios de laboratório**. Dissertação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

Balsam WL, Otto-Bliesner BL, Deaton BC (1995) Modern and last glacial maximum eolian sedimentation patterns in the Atlantic Ocean interpreted from sediment iron oxide content. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, v. 10, n. 3, p. 493-507, 1995.

Barbosa RS, Júnior JM, Barrón V, Martins Filho MV, Siqueira DS, Peluco RG, Silva LS (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**, v. 78, n. 1, p. 12.

Barrón V, Mello JWV, Torrent, J (2000) Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 139-162.

Bernet M (2019) Exhumation studies of mountain belts based on detrital fission-track analysis on sand and sandstones. In: **Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology**. Springer, Cham, 2019. p. 269-277.

Bharti VK, Bhan S (2018) Impact of artificial intelligence for agricultural sustainability. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 17, n. 4, p. 393-399.
Buckman HO, Brady NC (1976) Natureza e propriedades dos solos. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 4ª edição, 594 p. (Tradução de A.B.N. Figueiredo).

Camargo MN (1987) **Classificação de solos usado em levantamentos pedológicos no Brasil**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Camargo MN, Klamt e, Kauffman JH (1987) **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, v. 12, p. 11-33.

Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 4, p. 287.

Chen W, Xie X, Wang J, Pradhan B, Hong H, Bui DT, Ma J. (2017) A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. **Catena**, v. 151, p. 147-160.

Chiossi N (2013) **Geologia de Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 424 p.

Chlingaryan A, Sukkarieh S, Whelan B (2018) Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 151, p. 61-69.

Coelho MR, VIDAL-TORRADO, P (2003) Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru: II-mineralogia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 495-507, 2003.

Coleman, R. G., Gregory, R. T., & Brown, G. F. (2016) **Cenozoic volcanic rocks of Saudi Arabia** (No. 83-788). US Geological Survey.

Cornell RM, Schwertmann U (1996). **The Iron Oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. Weinheim: Wiley VCH, 1996. 573 p.

Cornell RM, Schwertmann U (2003) **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence, and uses. 2. ed. Weinheim: Wiley VCH, 2003. 664 p.

Coward EK, Thompson AT, Plante AF (2017) Iron-mediated mineralogical control of organic matter accumulation in tropical soils. **Geoderma**, v. 306, p. 206-216.

Crane-Droesch A (2018) Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 11, p. 114003.

CRUZ M(2017) Avaliação de cenários futuros de precipitação frente à previsão de mudanças climáticas no Estado de Sergipe. In: **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS, 7., 2017, Aracaju. Anais... Brasília, DF: Embrapa.

Cunha ADM, Fontes MPF, Lani JL (2019) Mineralogical and chemical attributes of soils from the Brazilian Atlantic Forest domain. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p. 82-92.

Cunha P, Marques Júnior J, Curi N, Pereira GT, Lepsch IF (2005) Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 81-90.

Curi N, Franzmeier DP (1984) Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 341-346.

Cutler A, Cutler DR, Stevens JR (2012) Random forests. In: **Ensemble machine learning**. Springer, Boston, MA, 2012. p. 157-175.

Dahikar SS, Rode SV (2014) Agricultural crop yield prediction using artificial neural network approach. **International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering**, v. 2, n. 1, p. 683-686.

Darr MJ, McNaull R, Kruckeberg J, Bonefas ZT (2016) **Artificial intelligence for detecting and filling void areas of agricultural commodity containers**. U.S. Patent n. 9,392,746, 19 jul.

Das S, Essilfie-Dughan J, Hendry MJ (2014) Arsenate adsorption onto hematite nanoparticles under alkaline conditions: effects of aging. **Journal of nanoparticle research**, v. 16, n. 7, p. 2490.

Das S, Essilfie-Dughan J, Hendry MJ (2014) Arsenate adsorption onto hematite nanoparticles under alkaline conditions: effects of aging. **Journal of nanoparticle research**, v. 16, n. 7, p. 2490.

Das S, Hendry MJ (2011) Changes of crystal morphology of aged goethite over a range of pH (2–13) at 100°C. **Applied Clay Science**, 51, 192–197.

Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, François LM, Allegre CJ (2003) Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. **Chemical Geology**, v. 202, n. 3-4, p. 257-273.

Embrapa (2010) Agência Embrapa de informação tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br.html>>. Acesso em 18/03/2019.

Embrapa (2013) - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, 353 p.

Eren M, Kaplan MY, Kadir S, Kapur S (2018) Biogenic (β -fabric) features in the hard laminated crusts of the Mersin and Adana regions, southern Turkey and the role of soil organisms in the formation of the calcrete profiles. **Catena**, v. 168, p. 34-46, 2018.

Espindola CR (2017) Material de origem do solo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 1, p. 59-70.

Fang Q, Hong H, Zhao L, Kukolich S, Yin K, Wang C (2018) Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: a review. **Journal of Spectroscopy**, v. 2018.

Farina R, Di Bene C, Piccini C, Marchetti A, Troccoli A, Francaviglia R (2018) Do Crop Rotations Improve the Adaptation of Agricultural Systems to Climate Change? A Modeling Approach to Predict the Effect of Durum Wheat-Based Rotations on Soil Organic Carbon and Nitrogen. In: **Soil Management and Climate Change**. Academic Press, p. 221-236.

Fink JR, Inda AV, Bavaresco J, Barrón V, Torrent J, Bayer C (2016) Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68.

Finke, P, Opolot E, Balesdent J., Berhe AA., Boeckx P, Cornu S, Doetterl S 2019 Can SOC modelling be improved by accounting for pedogenesis?. **Geoderma**, v. 338, p. 513-524.

Formenti P, Caquineau S, Chevaillier S, Klaver A, Desboeufs K, Rajot JL, Briois V (2014) Dominance of goethite over hematite in iron oxides of mineral dust from Western Africa: Quantitative partitioning by X-ray absorption spectroscopy. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 22, p. 12,740-12,754.

Frasca MHB de O; Sartori PLP (1998) Minerais e Rochas. In: OLIVEIRA AM dos S, BRITO SNA de. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Cap. 2. p. 15-38.

Galvez N, Barron V, Torrent J (1999) Effect of phosphate on the crystallization of hematite, goethite, and lepidocrocite from ferrihydrite. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, n. 3, p. 304-311.

Global Climate Change. Disponível em <https://climate.nada.gov/vitalsigns/carbon-dioxide/>. Acesso em: 30 jun. 2019.

Gao X, Hao Q, Wang L, Oldfield F, Bloemendal, J, Deng C, Li F (2018) The different climatic response of pedogenic hematite and ferrimagnetic minerals: Evidence from particle-sized modern soils over the Chinese Loess Plateau. **Quaternary Science Reviews**, v. 179, p. 69-86.

Gonçalves, F., Zanin, R. F. B., Somera, L. F., de Oliveira, A. D., Ferreira, J. W. S., da Costa Branco, C. J. M., & Teixeira, R. S. (2018) Caracterização Físico-Química e Mineralógica de Três Solos do Estado do Paraná. **Anais eletrônicos...** Salvador: ABMS, 2018. Disponível em: <www.cobramseg2018.com.br/trabalhos-cientificos.html>. Acesso em: 01 abril. 2019.

Grimley DA, Vepraskas MJ (2000) Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180.

Grotzinger J, Jordan T (2013) **Para Entender a Terra-6**. Bookman Editora.

Grunwald S (2016) What do we really know about the space–time continuum of soil-landscapes?. In: **Environmental Soil-Landscape Modeling**. CRC Press, p. 16-49.

Guo H, Barnard AS (2013) Naturally occurring iron oxide nanoparticles: morphology, surface chemistry and environmental stability. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 1, n. 1, p. 27-42.

Han SZ, Pan WT, Zhou YY, Liu ZL (2018) Construct the prediction model for China agricultural output value based on the optimization neural network of fruit fly optimization algorithm. **Future Generation Computer Systems**, v. 86, p. 663-669.

Hanke D, Melo VDF, Dieckow J, Dick DP, Bognola IA (2015) Influência da matéria orgânica no diâmetro médio de minerais da fração argila de solos desenvolvidos de basalto no sul do Brasil. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.

He L, Zhao X, Wang S, Xing G. (2016) The effects of rice-straw biochar addition on nitrification activity and nitrous oxide emissions in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 164, p. 52-62.

Hengl T, de Jesus JM, Heuvelink GB, Gonzalez MR, Kilibarda M, Blagotić A, Guevara MA (2017) Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS one**, v. 12, n. 2, p. e0169748.

Hickey-Vargas R, Holbik S, Tormey D, Frey FA, Roa HM (2016) Basaltic rocks from the Andean Southern Volcanic Zone: Insights from the comparison of along-strike and small-scale geochemical variations and their sources. **Lithos**, v. 258, p. 115-132.

Inda Junior AV, Fink JR, Santos TFD (2018) Pedogenic iron oxides in soils of the Acre State, Brazil. **Ciência rural. Santa Maria**. Vol. 48, n. 8.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. Climate Change (2007) Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, **Cambridge**.

IPCC (2014) Summary for policymakers. In V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), Climate change 2014–impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects (p. 34). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Janitza S, Tutz G, Boulesteix AL (2016) Random forest for ordinal responses: prediction and variable selection. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 96, p. 57-73.

Jiang Z, Liu Q, Dekkers MJ, Barrón V, Torrent J, Roberts AP (2016) Control of Earth-like magnetic fields on the transformation of ferrihydrite to hematite and goethite. **Scientific reports**, v. 6, p. 30395.

Kalev SD, Toor GS (2018) The Composition of Soils and Sediments. In *Green Chemistry* (pp. 339-357). **Elsevier**.

Kämpf N, Curi N (2000) Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 107-138.

Kämpf N, Schwertmann U (1983) Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v. 29, n. 1, p. 27-39, 1983.

Kellogg CE (1949) Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. **Commonwealth Bureau of Soil Science Technical Communication**, v. 46, p. 76-85.

Ker JC (1997) Latossolos do Brasil: uma revisão. **Revista Geonomos**, v. 5, n. 1.

Khormali F, Toomanian N (2018) Soil-Forming Factors and Processes. In: **The Soils of Iran**. Springer, Cham, p. 73-91.

Kim Ji, Choi SH, Koh GW, Parque JB, Ryu JS (2019) Petrogênese e características da fonte do manto de rochas vulcânicas na Ilha de Jeju, Coréia do Sul. **Lithos**, v. 326, 476-490.

King A (2017) The future of agriculture. **Nature**, v. 544, n. 7651, p. S21-S23.

Klein C, Dutrow B (2009) **Manual de ciência dos minerais**. 23^o.ed. Bookman Editora., 417-419 p.

Klein C, Hurlbut CS (1996) **Manual de mineralogia**, (Vol. 2). 4° ed. Editorial Revertê., 419-421 p.

Lafon S, Rajot JL, Alfaro SC, Gaudichet A (2004) Quantification of iron oxides in desert aerosol. **Atmospheric Environment**, v. 38, n. 8, p. 1211-1218.

Lepsch IF(2016) **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos.

Liakos K, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D (2018) Machine learning in agriculture: A review. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 2674.

Linck MR (2018) **Variabilidade pedogênica e valores de referência de qualidade de elementos-traço**. Tese (Agronomia) – FAMV, Passo fundo.

Liu Q, Roberts AP, Larrasoana JC, Banerjee SK, Guyodo Y, Tauxe L, Oldfield F (2012) Environmental magnetism: principles and applications. **Reviews of Geophysics**, v. 50, n. 4.

Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, **333**, 616– 620.

Louppe G (2014) Understanding random forests: From theory to practice. Dissertation (Computer Science) - University of Liège Faculty of Applied Sciences, Liège.

Lu W, Zhao W, Balsam W, Lu H, Liu P, Lu z, Ji J. (2017) Iron Mineralogy and Speciation in Clay-Sized Fractions of Chinese Desert Sediments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 24.

Lucas LDS (2011) Árvores, Florestas e Sua Função Como Preditores: Uma Aplicação na Avaliação do Grau de Maturidade de Empresas. **Af-Revista PMKT**, p. 6-11.

Lybrand RA, Rasmussen C (2018) Climate, topography, and dust influences on the mineral and geochemical evolution of granitic soils in southern Arizona. **Geoderma**, v. 314, p. 245-261, 2018.

Mahmoudi E, Moore F, Asadi S (2018) Leached caps mineralogy and geochemistry as supergene enrichment fertility indicators, Meiduk and Parkam porphyry copper deposits, SW Iran. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 194, p. 198-209.

Makuvu V, Walker S, Masere TP, Dimes J (2018) Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. **Journal of arid environments**, v. 152, p. 75-82.

Manzione RL (2018) Modelagem matemática e estatística aplicada à hidrogeografia e agrometeorologia. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 847.

Marcos ZZ (1979) **Ensaio sobre epistemologia pedológica**. Tese de livre docência – ESALQ, Piracicaba.

Markus A, Shamsuddin J, Fausia CIA and Omar SR (2008) Mineralogy and factors controlling charge development of three Oxisols developed from different parent materials. *Geo Journal*, 143: 153-167.

Mergelov N, Mueller CW, Prater I, Shorkunov I, Dolgikh A, Zazovskaya E, Goryachkin S (2018) Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 3367.

Mishra S, Mishra D, Santra GH (2016) Applications of machine learning techniques in agricultural crop production: a review paper. **Indian J. Sci. Technol**, v. 9, n. 38, p. 1-14.

Moore FC, Lobell DB (2015) The fingerprint of climate trends on European crop yields. **Proceedings of the National Academy of sciences**, v. 112, n. 9, p. 2670-2675.

Moore FC, Lobell DB (2015) The fingerprint of climate trends on European crop yields. **Proceedings of the National Academy of sciences**, v. 112, n. 9, p. 2670-2675.

Moreira PSP, dos Santos Galvanin EA, Dallacort R, Neves RJ (2016) Análise de agrupamento aplicado ao ciclo diário das variáveis meteorológicas nos biomas do estado de Mato Grosso. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 1, p. 80-94.

Nabiollahi K, Eskandari S, Taghizadeh-Mehrdadi R, Kerry R, Triantafalis J (2019) Assessing soil organic carbon stocks under land-use change scenarios using random forest models. **Carbon Management**, p. 1-15.

Nóbrega MT, Edézio DJ (2011). A paisagem, os solos e a suscetibilidade à erosão. **Espaço Plural**, v. 12, n. 25.

Nonaka AG, Batista MA, Costa ACSD, Inoue TT, Bonadio TGM, Souza Junior IGD (2017) Kinetics of Thermal Transformation of Synthetic Al-Maghemites into Al-Hematites. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.

Noordin WD, Zulkefly S, Shamsuddin J, Hanafi MM (2017) IMPROVING SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND GROWTH PERFORMANCE OF Hevea brasiliensis THROUGH BASALT APPLICATION. **International Proceedings of IRC 2017**, v. 1, n. 1, p. 308-323.

Nsor ME, Ibanga IJ (2008) Morphological characteristics and classification of soils derived from diverse parent Materials in Central Cross River State, Nigeria. **Global Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 14, n. 3, p. 271-278, 2008.

Okada H (1971) Classification of sandstone: Analysis and proposals. **Journal Geology**, v. 79, p. 509-525.

Olim DM, Afu SM, Ediene VF, Uko IE, Akpa EA (2019) Morphological and Physicochemical Properties of Basaltic Soils on a Toposequence in Ikom, South Eastern Nigeria. **World News of Natural Sciences**, v. 22, p. 84-92.

Oliveira JB (1992) **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**, Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201 p.

Oliveira M, Zanardo A, De Carvalho SG, Da Rocha RR (2016) Características mineralógicas e granulométricas das fontes de poeiras no Polo Cerâmico de Santa Gertrudes-SP (Mineralogical and granulometric characteristics of dust sources in the Ceramic Cluster of Santa Gertrudes-SP). **Cerâmica**, v. 62, p. 198-205.

Patrício DI, Rieder R (2018) Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 69-81.

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P (2016) Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49.

Poggenburg C, Mikutta R, Schippers A, Dohrmann R, Guggenberger G (2018) Impact of natural organic matter coatings on the microbial reduction of iron oxides. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 224, p. 223-248.

Pouladi N, Møller AB, Tabatabai S, Greve MH (2019) Mapping soil organic matter contents at field level with Cubist, Random Forest and kriging. **Geoderma**, v. 342, p. 85-92.

Ramaroson, V. H., Becquer, T., Sá, S. O., Razafimahatratra, H., Delarivière, J. L., Blavet, D., ... & Rakotondrazafy, A. F. (2018) Mineralogical analysis of ferrallitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. **Catena**, 168, 102-109.

Ratié G, Vantelon D, Kalahroodi EL, Bihannic I, Pierson-Wickmann AC, Davranche M (2019) Iron speciation at the riverbank surface in wetland and potential impact on the mobility of trace metals. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 443-455.

Repe B, Simončič P, Vrščaj B (2017) Factors of Soil Formation. In: **The Soils of Slovenia**. Springer, Dordrecht, p. 19-60.

Resende M (2005) **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. UFLA, 1°.ed. [S.l.]:Editora UFLA, 94-95 p.

Resende M, Bahia Filho AFC, Braga JM (1987) Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.

Reynolds RL, Goldstein HL, Moskowitz BM, Bryant AC, Skiles, SM, Kokaly RF, Ketterer M (2014) Composition of dust deposited to snow cover in the Wasatch Range (Utah, USA): Controls on radiative properties of snow cover and comparison to some dust-source sediments. **Aeolian Research**, v. 15, p. 73-90.

Rhoden AC, Muhl FR, Feldmann NA, Pavan D, Dauernheimer R, dos Santos J (2015). Fatores de formação dos solos na região de Itapiranga. **Anais eletrônicos...** Itapiranga – Santa Catarina: AGROTEC, 2015. Disponível em: <<http://faifaculdades.edu.br/eventos/AGROTEC/1AGROTEC.html>>. Acesso em: 01 abril. 2019.

Ribeiro FCA, Silva JIR, Lima ESA, do Amaral Sobrinho NMB, Perez DV, Lauria DC (2018) Natural radioactivity in soils of the state of Rio de Janeiro (Brazil): Radiological characterization and relationships to geological formation, soil types and soil properties. **Journal of environmental radioactivity**, v. 182, p. 34-43.

Riedel F, Denk M, Müller I, Barth N, Gläßer C (2018) Prediction of soil parameters using the spectral range between 350 and 15,000 nm: A case study based on the Permanent Soil Monitoring Program in Saxony, Germany. **Geoderma**, v. 315, p. 188-198.

Rogelj J, Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete, H, Winkler H, Meinshausen, M (2016) Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature*, **534**, 631– 639.

Romani LAS, Bambini MD, Coltri PP, Junior AL, Koenigkan LV, Otavian AF, Assad ED (2016) Romani LAS, Bambini MD, Coltri PP, Junior AL, Koenigkan LV, Otavian AF, Assad ED (2016) Sistema de Monitoramento Agrometeorológico-Agritempo: inovação em rede apoiando políticas públicas e a tomada de decisão agrícola. **Agrometeoros**, v. 24, n. 1.

Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Neumann K (2014) Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3268-3273.

Rossel RV, McGlynn RN, McBratney AB (2006) Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 137, n. 1-2, p. 70-82.

Salvatore M, Truitt K, Roszell K, Lanza N, Rampe E, Mangold N, Clegg S (2019) Investigating the role of anhydrous oxidative weathering on sedimentary rocks in the Transantarctic Mountains and implications for the modern weathering of sedimentary lithologies on Mars. **Icarus**, v. 319, p. 669-684.

Santos HG (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 353p.

Santos HG, Jacomine PK T, Dos Anjos LH C, De Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, CUNHA T (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa.

Santos RD. et al. (2013) Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6. ed. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 100 p.

Scheffer VB (1958) **Seals, sea lions, and walruses: a review of the Pinnipedia**. Stanford, Calif.: Stanford University Press.

Schleussner CF, Deryng D, Müller C, Elliott J, Saeed F, Folberth C, Seneviratne SI (2018) Crop productivity changes in 1.5 C and 2 C worlds under climate sensitivity uncertainty. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 064007.

Schulze DG, Schwertmann U (1984) The influence of aluminium on iron oxides: X. Properties of Al-substituted goethites. **Clay Minerals**, v. 19, n. 4, p. 521-539.

Schwertmann U (1988) Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: **Iron in soils and clay minerals**. Springer, Dordrecht, p. 267-308.

Schwertmann U, Cornell RM (2000) **Iron Oxides in the Laboratory**. Weinheim, Wiley-VCH.

Schwertmann U, Cornell RM (2007) **Iron Oxides in the Laboratory**, Wiley-VCH Verlag GmbH.

Schwertmann U, Kämpf N (1985) Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, v. 139, n. 4, p. 344-350.

Schwertmann, U. (1985) The effect of pedogenic environments on iron oxides. **Adv Soil Sci**, v. 1, p. 172-200.

Shah A, Dubey A, Hemnani V, Gala D, Kalbande DR (2018) Smart Farming System: Crop Yield Prediction Using Regression Techniques. In: **Proceedings of International Conference on Wireless Communication**. Springer, Singapore, 2018. p. 49-56.

Silva LS (2016) **Mineralogia da fração argila dos solos do planalto ocidental Paulista**. Dissertação (Agronomia –Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

Silva PAD (2018) Distribuição espacial da estabilidade do carbono do solo em latossolos cultivados com cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. Dissertação (Agronomia –Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

Simonson RW (1967) Soil classification in the United States. Soil Science Society of America, 415-428 (Special Publication, 1).

Singh M, Sarkar B, Sarkar S, Churchman J, Bolan N, Mandal S, Beerling DJ (2018) Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, p. 33-84.

Suguio K (2003) **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Ed. Blucher.

Szabó GAJ, Babinski M, Teixeira W. Rochas ígneas. In: **Decifrando a Terra**. Ed: Teixeira W, Toledo MCM, Fairchild TR, Taioli F. 2ª ed. IBEP, 2010, p. 327-346.

Taylor RM, Graley AM (1967) He influence of ionic environment on the nature of iron oxides in soils. **Journal of soil science**, v. 18, n. 2, p. 341-348.

Teixeira JB (2017) **Petrografia de rochas reservatório areníticas e relação com diferentes técnicas de obtenção de parâmetros petrofísicos**. Dissertação (Geociências) – UFF, Niterói.

Till JL, Nowaczyk N (2018) Authigenic magnetite formation from goethite and hematite and chemical remanent magnetization acquisition. **Geophysical Journal International**, v. 213, n. 3, p. 1818-1831.

Torrent J, Barrón V (1993) Laboratory measurement of soil color: theory and practice. **Soil color**, n. soilcolor, p. 21-33.

Torrent J, Guzman R (1982) Crystallization of Fe (III)-oxides from ferrihydrite in salt solutions: osmotic and specific ion effects. **Clay Minerals**, v. 17, n. 4, p. 463-469.

Torrent J, Guzman R (1982). Crystallization of Fe (III)-oxides from ferrihydrite in salt solutions: osmotic and specific ion effects. **Clay Minerals**, v. 17, n. 4, p. 463-469, 1982.

Tol, R. S. (2016) The impacts of climate change according to the IPCC. **Climate Change Economics**, v. 7, n. 01, p. 1640004.

Tremocoldi WA (2003) Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro na fração argila de solos desenvolvidos de rochas básicas no estado de São Paulo. **Rev Bras Biocienc**, 9:15-22.

Usman M, Byrne JM, Chaudhary A, Orsetti S, Hanna K, Ruby C, Haderlein SB (2018) Magnetite and green rust: synthesis, properties, and environmental applications of mixed-valent iron minerals. **Chemical reviews**, v. 118, n. 7, p. 3251-3304.

Valencia E, Gross N, Quero JL, Carmona CP, Ochoa V, Gozalo B, Bonkowski, M (2018) Cascading effects from plants to soil microorganisms explain how plant species richness and simulated climate change affect soil multifunctionality. **Global change biology**, v. 24, n. 12, p. 5642-5654.

Van Meijl H, Havlik P, Lotze-Campen H, Stehfest E, Witzke P, Domínguez IP, Humpenöder F (2018) Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 064021.

Vasyukova EV, Oliva P, Viers J, Martin F, Dupré B, Pokrovsky OS. (2019) Chemical weathering of mafic rocks in boreal subarctic environment (northwest Russia) under influence of glacial moraine deposits. **Chemical Geology**, v. 509, p. 115-133.

Vindedahl AM, Strehlau JH, Arnold WA, Penn RL (2016) Organic matter and iron oxide nanoparticles: aggregation, interactions, and reactivity. **Environmental Science: Nano**, v. 3, n. 3, p. 494-505.

Vingiani S, Di Iorio E, Colombo C, Terribile F (2018) Integrated study of Red Mediterranean soils from Southern Italy. **Catena**, v. 168, p. 129-140.

Vital AFM, Cavalcante FL, Araújo JMM, Barbosa IS, Oliveira DS, Azevedo GH (2018) Uso não Agrícola do solo: a tinta de terra como inovação tecnológica e sustentável/non agricultural use of soil: earth ink as technological and sustainable innovation. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 144-151.

Volland-Tuduri N, Bruand A, Brossard M, Balbino LC, de Oliveira MIL, de Souza Martins É (2005) Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 5, p. 1559-1564.

Wade J, Waterhouse H, Roche LM, Horwath WR (2018) Structural equation modeling reveals iron (hydr) oxides as a strong mediator of N mineralization in California agricultural soils. **Geoderma**, v. 315, p. 120-129.

Woznicki SA, Baynes J, Panlasigui S, Mehaffey M, Neale A (2019) Development of a spatially complete floodplain map of the conterminous United States using random forest. **Science of the total environment**, v. 647, p. 942-953.

Yan Q, Shi X, Metcalfe I, Liu S, Xu T, Kornkanitnan N, Zhang H. (2018) Hainan mantle plume produced late Cenozoic basaltic rocks in Thailand, Southeast Asia. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 2640.

Yu F, Hunt AG (2018) Predicting soil formation on the basis of transport-limited chemical weathering. **Geomorphology**, v. 301, p. 21-27.

Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Jafari A, Tajik S, Finke P (2019) Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. **Geoderma**, v. 338, p. 445-452.

Zhang H, Zho G, Li Liu D, Wang B, Xiao D, He L (2019) Climate-associated rice yield change in the Northeast China Plain: A simulation analysis based on CMIP5 multi-model ensemble projection. **Science of The Total Environment**, v. 666, p. 126-138.

Zhao W, Tan WF (2018) Quantitative and structural analysis of minerals in soil clay fractions developed under different climate zones in China by XRD with

Rietveld method, and its implications for pedogenesis. **Applied Clay Science**, v. 162, p. 351-361, 2018.

Zhou Y, Retallack GJ, Huang C (2015) Early Eocene paleosol developed from basalt in southeastern Australia: implications for paleoclimate. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 3, p. 1281-1290.

CAPÍTULO 2 - CONCENTRAÇÕES DE HEMATITA E GOETITA EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO - O conhecimento das relações do sistema solo-planta-atmosfera é complexo e essencial para a manutenção da sustentabilidade das áreas produtivas no mundo. Poucos estudos lidam com essas relações especialmente em diferentes cenários de mudanças climáticas. Sabe-se que os óxidos de ferro têm ligação com o potencial produtivo em regiões agrícolas e estão presentes no solo principalmente na forma de goetita (Gt) e de hematita (Hm). As concentrações desses óxidos estão diretamente associadas ao clima. Apesar dos óxidos de ferros serem considerados pedoindicadores ambientais por refletir as condições ambientais de sua formação e serem estáveis no solo por longo tempo, estes tem apresentado diferenças no teor em intervalo de tempo menor. O objetivo deste estudo foi estabelecer modelos para estimação de concentrações de goetita e hematita em solos de formações areníticas e basálticas, de várias regiões do mundo, com as condições climáticas médias de 30 anos de dados de temperatura do ar e pluviometria, além de gerar concentrações destes óxidos em cenários otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas sugerida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Uma metanálise foi efetuada, prospectando as concentrações de Gt (g kg^{-1}) e Hm (g kg^{-1}) em 50 localidades no mundo. Os dados meteorológicos diários de temperatura do ar (T) e precipitação (P) foram obtidos da plataforma NASA-POWER para um período de 30 anos anterior à data de publicação de cada artigo referente às localidades analisadas. Foi usada uma análise multivariada de componentes principais (PCA), para identificar a importância de cada variável meteorológica na formação de Gt e Hm no mundo. As concentrações de Gt e Hm foram relacionadas à T e à P por modelos de regressão linear simples (SLRM) e também por gráficos de contorno. Buscando acurácia na estimação de Gt e Hm para o mundo a partir de T e P aplicou-se o modelo de aprendizagem de máquina Random Forest Regressor (RF). Mapas foram gerados considerando cenário otimista e pessimista de mudanças climáticas e comparados com a condição atual. Os resultados indicam que a Gt apresenta uma correlação linear direta com a precipitação anual, inferindo que quanto maior a intensidade da precipitação mais redutor é o ambiente formando preferencialmente minerais de baixa cristalinidade (goetita). Por outro lado, a temperatura do ar e a baixa presença da água favorece a formação de hematita devido a facilidade de desidratação da ferrydrita. O modelo RF apresentou um bom desempenho para fazer previsão de Gt e Hm, com $R^2 = 0.85$ e $\text{RMSE} = 22.35 \text{ g kg}^{-1}$. As concentrações de Gt aumentam nos cenários otimista e pessimista para o mundo, enquanto a Hm diminui para ambos os cenários.

Palavras-chave: óxidos de ferro, temperatura, precipitação, alteração do clima.

HEMATITA AND GOETHITA CONCENTRATIONS IN DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS

ABSTRACT – The knowledge of the relationships of the soil-plant-atmosphere system is complex and essential for the maintenance of the sustainability of the productive areas in the world. Few studies deal with these relationships especially in different scenarios of climate change. It is known that iron oxides are linked to productive potential in agricultural regions and, are present in the soil mainly in the form of goethite (Gt) and hematite (Hm). The concentrations of these oxides are directly associated with the climate. Although iron oxides are considered environmental pedoindicators because they reflect the environmental conditions of their formation and have been stable in the soil for a long time, they have presented differences in the content in less time interval. The objective this study was establish models for estimation of goethite and hematite concentrations in arenaceous and basaltic soils from several regions the world, with the average climatic conditions 30 years of air temperature and rainfall data, in addition to generating concentrations of these oxides in optimistic scenarios (RCP 2.6) and pessimistic (RCP 8.5) climate change suggested by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). A meta-analysis was carried out, prospecting concentrations of Gt (g kg⁻¹) and Hm (g kg⁻¹) in 50 localities in world. The daily air temperature (T) and precipitation (P) data were obtained from the NASA-POWER platform for a period of 30 years prior to the publication date of each article referring to the analyzed locations. A multivariate principal component analysis (PCA) was used identify the importance of each meteorological variable in the formation of Gt and Hm in the world. Concentrations of Gt and Hm were related to T and P by simple linear regression models (SLRM) and also by contour plots. Searching, accuracy in the estimation of Gt and Hm to the world from T and P, was applied to the Random Forest Regressor (RF) machine learning model. Maps were generated considering optimistic and pessimistic climate change scenario and compared with the current condition. The results indicate that Gt presents a direct linear correlation with the annual precipitation, inferring that the higher the intensity of the more reductive precipitation is the environment preferentially forming minerals of low crystallinity (goethite). On the other hand, the air temperature and the low water presence favor the formation of hematite due to the ease of dehydration of the ferrydrite. The RF model presented a good performance to predict Gt and Hm, with $R^2 = 0.85$ and RMSE = 22.35. Concentrations of Gt increase in the optimistic and pessimistic scenarios for the world, while Hm decreases for both scenarios.

Keywords: iron oxides, temperature, precipitation, climate change.

2.1 Introdução

A formação do solo é determinada por fatores relacionados com o material de origem, relevo, organismo vivos, clima e tempo (AMUNDSON, 2016). Uma característica importante dos solos é a sua composição mineralógica, que depende do grau de intemperização que a rocha mãe foi submetida (WILSON et al., 2017).

A composição mineralógica do solo, é o aspecto que mais influencia no comportamento físico e químico, além de indicar a reserva potencial de minerais e nutrientes para a agricultura (CATONI et al., 2016).

Os solos altamente intemperizados são caracterizados pelo acúmulo de óxidos e hidróxidos de ferro (TERRA, 2018), frequentemente nas formas de goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e hematita (Fe_2O_3). Esses minerais exercem influência positiva na estruturação e agregação dos solos (RATIÉ et al., 2019), e nas feições morfológicas como a sua cor.

O ferro, quando oxidado, apresenta uma alta capacidade de pigmentação, principalmente quando desidratado. A cor vermelha dos solos está associada a presença de óxidos de ferro desidratados (hematita) (HIRSCH et al., 2019), enquanto que a cor amarela indica a ocorrência de ferro oxidado hidratado (goetita) (ZHOU et al., 2017).

De acordo com o modelo pedogênico de formação dos óxidos de ferro, a goetita e hematita são formados durante o processo de intemperismo dos minerais primários, uma vez que a intensidade do intemperismo é controlada pelas condições de chuva e temperatura (FONTES; WEED, 1991). Por estes motivos os óxidos de ferro são considerados pedoindicadores ambientais, por refletirem as condições de pedogênese sob as quais teriam sido formados (FITZPATRICK; SCHWERTMANN, 1982).

A goetita e hematita formam-se em condições distintas. O clima influencia diretamente na disponibilidade destes minerais no solo. A goetita pode ser encontrada em diferentes solos e regiões climáticas, baixas temperaturas e altas precipitações favorecem a sua formação. Enquanto que, a hematita ocorre em condições opostas, baixas precipitações e climas mais quentes (TORRENT; GUZMAN, 1982; SCHWERTMANN; KÄMPF, 1985).

Nos solos intemperizados dos trópicos e subtropicais, principalmente os Latossolos e Argissolos, hematita e goetita são os minerais dominantes (TAO, 2019).

Estudando uma topossequência de latossolo originado de rocha basáltica, Curi e Franzmeier (1984) observaram que a intemperização era menor em solos encontrados em posições mais inclinadas, no entanto solos em posições mais altas, eram mais oxidicos contendo altas concentrações de hematita.

Hirsch et al (2019) relataram a hematita e goetita como minerais presentes em solos arenosos do nordeste da Alemanha, Abaka-Wood (2019) em solos da Austrália do Sul e Chen et al. (2019), na Carolina do Sul, EUA.

Segundo, Kämpf e Schwertmann (1983), os estudos de Taylor e Graley (1967), Schwertmann et al. (1982) são os únicos que fazem uma relação entre as concentrações de goetita e hematita com o clima.

SILVA (2016), citou que a quantificação das concentrações de óxidos de ferro no solo é feita por técnicas de difratometria de raios-X (DRX), espectroscopia de reflectância difusa (ERD), pelo método indireto de suscetibilidade magnética (SM). Almeida (2012) relatou a identificação destes minerais por meio de ferramentas de sensoriamento remoto.

O uso de inteligência artificial representa uma estratégia eficiente de simulação e otimização de processos importantes na agricultura (DORNELLES et al., 2018). Diante disso, agricultores estão aderindo o conceito de agricultura 4.0, pois possibilita a interferência e conexão de softwares e sistemas digitais às máquinas, significando um maior monitoramento, gestão e controle da produção agrícola e redução de custos. A evolução das tecnologias digitais, nos leva então ao uso de técnicas de machine learning a partir da criação de modelos que auxiliam na tomada de decisão (LEAL et al., 2015).

Estudos como de Hengl (2017) mostrou a aplicação de técnicas machine learning ao avaliar a precisão do sistema SoilGrids, com resolução de 250 m, por meio de modelos ensemble. Enquanto que, Zeraatpisheh (2019) usou os modelos, Cubista, Floresta Aleatória e Árvore de Regressão, para fazer uma previsão espacial das principais propriedades do solo (carbono orgânico, teor de argila), na região central do Irã.

Um modelo de ML bastante usado na agricultura é o Random Forest (RF), este consiste em um método de aprendizado conjunto para classificação ou

regressão, que operam construindo diferentes árvores de decisão no tempo de treinamento (SHAH et al., 2018). Uma das vantagens deste é a rapidez para treinar e prever, dependendo apenas de um ou dois parâmetros de ajuste (NAWAR; MOUAZEN, 2017). Estudos como o de Zeraatpisheh (2019) mostra a aplicação do RF para fazer uma previsão espacial das principais propriedades do solo (carbono orgânico, teor de argila), na região central do Irã.

O setor agrícola depende fortemente dos fatores climáticos, por isso a mudança no clima pode afetar a agricultura de modo geral por meio de várias formas, principalmente a alteração da temperatura e modificações no regime de chuvas (Fellmann et al., 2018). Visto que estas variáveis climáticas são fatores ativos importantes no processo de intemperização das rochas e do solo.

A partir destas informações o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em seu quinto relatório (AR5), criou quatro projeções diferentes, mostrando o que ocorreria com o planeta em cenários diferentes para o final do século 21. Esses cenários são denominados como RCP (Caminhos Representativos de Concentração), determinados a partir do número de reflexão de radiação, conforme a mudança no comportamento antrópico mundial até o ano de 2100.

O cenário mais otimista é de $2,6 \text{ w/m}^2$, no qual o crescimento da radiação atingiria seu pico no meio do século e depois recuaria, com pico dos gases de efeito estufa entre os anos de 2010 e 2020, resultante de uma redução de emissão de gases de efeito estufa generalizada. Nessas condições a temperatura média mundial aumentaria $1,7^\circ\text{C}$. O cenário $8,5 \text{ w/m}^2$ é o mais pessimista, que considera a crescente emissão de gases até o final do século, e neste cenário o aumento no valor de radiação seria quatro vezes maior. Esta situação impactaria num aumento da temperatura em $4,8^\circ\text{C}$. Em ambos os cenários o aumento ou diminuição da precipitação varia de acordo com a região.

No entanto, a literatura não estabelece uma relação das mudanças climáticas em relação aos atributos dos solos, principalmente o efeito sobre a mineralogia.

Portanto, os objetivos deste estudo foi relacionar a concentração de hematita e goetita em solos de várias regiões do mundo com as condições climáticas médias de 30 anos de dados de temperatura do ar e pluviometria. E gerar concentrações desses óxidos em cenários otimistas (RCP 2,6) e

pessimistas (RCP 8,5) de mudanças climáticas preconizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo consistiu em países dos continentes Asiático, Africano, Europeu, América do Sul, América do Norte e Oceania (Figura 1). Foi conduzida uma metanálise a partir de revisão sistemática de artigos publicados, totalizando 50 localidades com informações de goetita (g kg^{-1}) e hematita (g kg^{-1}) (Tabela 1).

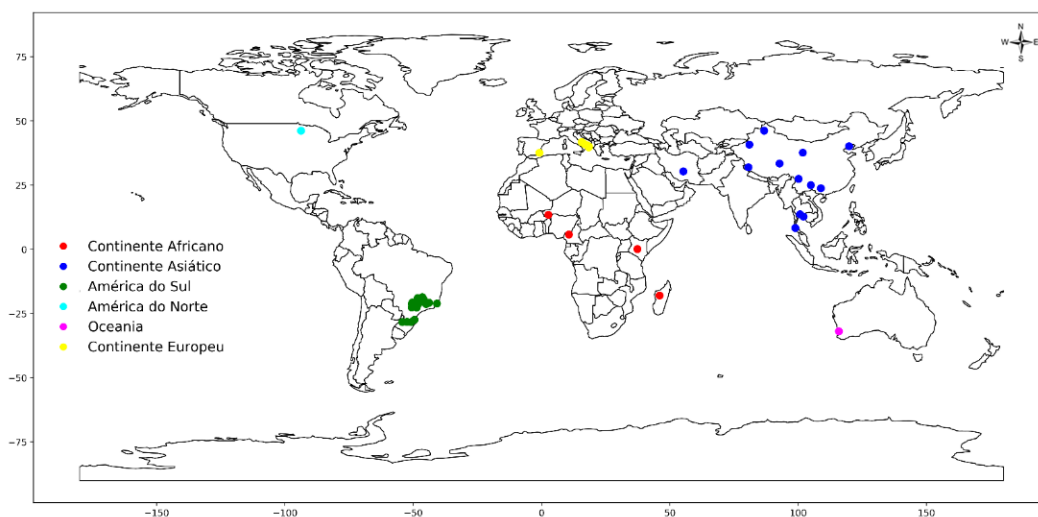


Figura 1 - Localização dos trabalhos usados na metanálise.

2.2.2 Metanálise

A técnica de metanálise consistiu em uma revisão quantitativa e resumida, integrando resultados de dois ou mais estudos independentes sobre um mesmo tema como descrito por Karl Pearson (1904).

Os dados utilizados neste estudo, referem-se a atributos mineralógicos do solo, especificamente concentrações de goetita (g kg^{-1}) e hematita (g kg^{-1}) no mundo, em solos cujo a formação estão moldadas em rochas areníticas, e rochas basálticas. Sendo estas concentrações prospectadas de 18 artigos publicados, provenientes de pesquisas bibliográficas realizadas do ano de 2001 a 2019. A pesquisa englobou buscas nas plataformas Scopus, Web of Science,

teses e dissertações, onde as palavras chaves usadas foram: *mineralogy, iron oxides, hematite and goethite*.

A metanálise envolveu os seguintes passos: Análise exploratória dos dados, métodos usados para identificar os óxidos de ferro e equipamentos usados. Identificação dos locais onde foram coletadas as amostras de solo para determinar Gt e Hm, também a latitude e longitude dos locais estudados também foram identificados (Tabela 1). De acordo com os autores estudados (Tabela 1), as estimativas destes minerais nos solos foram feitas por meio de técnicas de difratometria de raio-X (DRX) e espectroscopia de reflectância difusa (ERD).

Tabela 2 - Países estudados, com a prospecção das concentrações de hematita (g kg^{-1}) e Goetita (g kg^{-1}) e identificação dos autores dos respectivos artigos, usados para a metanálise.

Location	Country	Latitude	Longitude	Hm g kg^{-1}	Gt g kg^{-1}	Método	Köppen*	Author
Sandstone								
Níger	Africa	13.5000 (N)	2.6000 (E)	57	35	DRX	BSh	Formenti, P. et al., 2014
Jiujiang	China	25.0502 (N)	104.8663 (E)	11.16	3.78	ERD	Cwa	Yin, K. et al., 2018
Hunlun Buir	China	40.2163 (N)	119.7627 (E)	3.2	21.1	DRX/ERD	Dwa	Lu, W. et al., 2017
Gurbantunggu - China	China	46.2688 (N)	86.6672 (E)	2	26.3	DRX/ERD	BWk	Lu, W. et al., 2017
Xiaodongkemadi	China	33.5000 (N)	92.6666 (E)	5.6	24.4	DRX/ERD	ET	Cong, Z. et al., 2018
Palong no. 4 (PL) -Southeast TP	China	32.0188 (N)	80.5669 (E)	2.3	21.8	DRX/ERD	ET	Cong, Z. et al., 2018
Laohugou	China	37.6966 (N)	101.7291 (E)	2.8	20.8	DRX/ERD	ET	Cong, Z. et al., 2018
Baishui	China	27.4730 (N)	100.1175 (E)	1	53.5	DRX/ERD	Cwb	Cong, Z. et al., 2018
Maciço do Monte Quênia	África	0.1363 (N)	37.3066 (E)	25	9	DRX	Csb	Somelar, P. et al., 2018
Urumqi Tien Shan	China	40.8161 (N)	80.9483 (E)	2.4	19.8	DRX/ERD	BWk	Cong, Z. et al., 2018
Provincia de Hamersley	Australia	-31.8513 (S)	115.8047 (E)	14.1	17.7	DRX	Csa	Eggsleder, M. S. et al., 2019
S. M. Leuca	Italy	39.7927 (N)	18.3475 (E)	21	14	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
S Cesarea	Italy	40.0341 (N)	18.4435 (E)	30	13	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
Minervino	Italy	40.0875 (N)	18.4150 (E)	27	18	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
Corigliano	Italy	40.1611 (N)	18.2563 (E)	16	14	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
S. Michele Salentino 1	Italy	40.6302 (N)	17.6463 (E)	40	27	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
S. Michele Salentino 2	Italy	40.6324 (N)	17.6433 (E)	21	11	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
Bitetto	Italy	41.0477 (N)	16.7658 (E)	19	15	DRX	Csa	Vingiani, S. et al., 2018
S. Marco in Lamis	Italy	41.7048 (N)	15.6381 (E)	40	19	DRX	Cfa	Vingiani, S. et al., 2018
San Nicandro	Italy	41.8245 (N)	15.5821 (E)	33	10	DRX	Csc	Vingiani, S. et al., 2018
Sierra Minera	Spain	37.6197 (N)	-0.8641 (W)	50	40	DRX	BSk	Pérez-Sirvent, C. et al., 2018
São Gotardo - Minas Gerais	Brazil	-19.3122 (S)	-46.0455 (W)	0	28	DRX	Aw	Ferreira et al., 1999
Viçosa - Minas Gerais	Brazil	-20.7377 (S)	-43.8838 (W)	13	93	DRX	Cwa	Ferreira et al., 1999
Lavras - Minas Gerais -	Brazil	-21.2294 (S)	-45.0036 (W)	46	77	DRX	Cwa	Ferreira et al., 1999
Marataízes - Espírito Santo	Brazil	-21.0405 (S)	-40.8319 (W)	0	79	DRX	Aw	Ferreira et al., 1999

Location	Country	Latitude	Longitude	Hm g kg ⁻¹	Gt g kg ⁻¹	Método	Köppen*	Author
Sandstone								
Pederneiras - São Paulo	Brazil	-22.3433 (S)	-48.8406 (W)	12.9	21	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Guaíçara - São Paulo	Brazil	-21.6336 (S)	-49.8353 (W)	13	16	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
General Salgado - São Paulo	Brazil	-20.6402 (S)	-50.3185 (W)	8	17	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Guararapes - São Paulo	Brazil	-21.2081 (S)	-50.6580 (W)	16	32	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Madagascar	Africa	-17.9255 (S)	45.9413 (E)	12.2	33.6	DRX	Aw	Ramaroson, V. H. et al., 2018
Basalt								
Guangxi	China	23.8511 (N)	108.7825 (E)	26.7	7.4	DRX	Cfa	Liu, X. et al., 2010
Mbammassif - Camarões	Africa	5.8166 (N)	10.6000 (E)	20	131	DRX	Aw	Bomeni, I. Y. et al., 2018
NW Meiduk	Iran	30.4238 (N)	55.1663 (E)	49	86	DRX	BSk	Mahmoudi, E. at al., 2018
SE Meiduk	Iran	30.4238 (N)	55.1663 (E)	44	81	DRX	BSk	Mahmoudi, E. at al., 2018
Parkam	Iran	30.4458 (N)	55.1580 (E)	47	123	DRX	BSk	Mahmoudi, E. at al., 2018
Vacaria - Rio Grande do Sul	Brazil	-28.3002 (S)	-50.9316 (W)	62	262	DRX	Cfb	Bortoluzzi, Edson C. et al., 2015
Passo Fundo - Rio Grande do Sul	Brazil	-28.2416 (S)	-52.4119 (W)	176	85	DRX	Cfa	Bortoluzzi, Edson C. et al., 2015
Bom Jesus - Brasil - Rio Grande do Sul	Brazil	-27.3769 (S)	-49.5611 (W)	49	273	DRX	Cfa	Bortoluzzi, Edson C. et al., 2015
Santo Ângelo - Rio Grande do Sul	Brazil	-28.2955 (S)	-54.2675 (W)	348	203	DRX	Cfa	Bortoluzzi, Edson C. et al., 2015
Pitangueiras - São Paulo	Brazil	-20.9779 (S)	-48.2859 (W)	63	36	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Lençóis Paulista - São Paulo	Brazil	-22.6370 (S)	-48.7374 (W)	68	35	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Sertãozinho - São Paulo	Brazil	-21.1677 (S)	-48.0176 (W)	74	34	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Maracaí - São Paulo	Brazil	-22.6257 (S)	-50.6199 (W)	66	49	DRX	Aw	Gomes, R. P., 2017
Uberlândia - Minas Gerais	Brazil	-18.9019 (S)	-48.2753 (W)	134.4	23.4	DRX	Aw	Camêlo, et al., 2018
Uberaba - Minas Gerais	Brazil	-19.7417 (S)	-47.9400 (W)	93.3	16.5	DRX	Aw	Camêlo, et al., 2018
Patos de Minas - Minas Gerais	Brazil	-18.5416 (S)	-46.5188 (W)	158	34	DRX	Aw	Ferreira et al., 1999
Guarapari – Espírito Santo	Brazil	-20.5500 (S)	-40.5172 (W)	3.32	1.76	DRX	Am	Ferreira et al., 1999
Minnesota	United States	46.2500 (N)	-93.7497 (W)	41	63	DRX	Dfb	Formenti, P. et al., 2014
Ao Luek (Ak1/Ap)	Tailand	8.3735 (N)	98.7941 (E)	80	140	DRX	Am	Wisawapipat, W. et al., 2010
(Ti3/Ap)	Tailand	12.7597 (N)	102.0038 (E)	50	160	DRX	As	Wisawapipat, W. et al., 2010
Nong Bong (Nb2/Ap)	Tailand	13.6858 (N)	100.6602 (E)	50	190	DRX	Aw	Wisawapipat, W. et al., 2010

2.2.3 Dados Meteorológicos

Foi usada a linguagem de programação em Python 3.6 para coletar os dados agrometeorológicos de todos os locais estudados por meio de um API disponibilizado na plataforma NASA-POWER (STACKHOUSE et al., 2017). Esta plataforma dispõe de dados estimados em grid em uma grade de coordenadas $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (~55 km) a nível mundial, a partir de sensores meteorológicos de superfície, bóias oceânicas, sensores em aeronaves, navios e em satélites (MEDEIROS, 2012). Foram coletados dados diários de Precipitação (P, mm dia¹) e Temperatura do ar (T, °C) de uma série histórica de 30 anos. Estes dados foram tratados a fim de obter a precipitação e a temperatura do ar média, para período completo de 30 anos, antes da publicação de cada artigo utilizado na prospecção das concentrações de hematita e goetita. Foi feito o cálculo de um único valor por local de T e P correspondendo à média histórica para posteriores análises.

Foi utilizado também os dados meteorológicos da plataforma CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas) (KARGER et al., 2017), disponibilizada na forma raster. Os dados climáticos desta plataforma apresentam alta resolução (30 arcsec, ~ 1 km) e inclui padrões médios de temperatura do ar e precipitação para o período de 1979 a 2013.

2.2.4 Análise de dados

A análise foi feita em 2 etapas: a primeira buscou-se compreender as relações quantitativas entre os teores de Hm e Gt em função das condições climáticas médias de 30 anos de temperatura do ar e precipitação pluviométrica. Na segunda etapa aplicou-se um modelo de machine learning para estimar os teores de Hm e Gt para 2 cenários de mudanças climáticas.

A identificação quantitativa da importância de cada variável no sistema foi feita primeiramente por meio da análise multivariada de componentes principais (PCA), a análise de PCA foi feita com dados padronizados (média nula e variação constante). As novas variáveis são autovetores (componentes principais) gerados por combinações lineares de variáveis originais, construídas com autovalores da matriz de covariância (HAIR et al., 2009).

Empregou-se modelos de regressão linear simples (SLRM) tal que as variáveis independentes a temperatura do ar e precipitação pluviométrica e as variáveis dependentes os teores de Hm e Gt, separando-se os solos basálticos e areníticos.

Foram utilizados também regressões lineares múltiplas (MLRM), em modelos de regressão polinomial de terceira ordem, para avaliar o impacto conjunto da temperatura do ar e precipitação pluviométrica conjuntamente nos teores de Hm e Gt. Os resultados foram apresentados em gráficos de contorno.

Com a finalidade de avaliar o grau de ajuste entre os valores observados e estimados, os resultados foram avaliados quanto a sua precisão, por meio do coeficiente de determinação (R^2) e a acurácia pela raiz quadrada do erro-médio (RMSE - Root Mean Square Error) (equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}$$

(1)

Em que, n o número de observações, E_i e O_i os valores estimados e observados, respectivamente.

Na segunda etapa do trabalho, quando se procurou estimar acuradamente os teores dos óxidos de ferro para o mundo, foi utilizado um modelo de aprendizagem de máquina Random Forest Regressor (RF), a partir de dados médios de temperatura do ar e precipitação (valores de x), estes dados foram padronizados (média nula e variância constante). Para treinamento do modelo foram utilizados 50 pontos de Gt e Hm.

O algoritmo baseado em RF ajustou várias árvores de decisão a partir de várias subamostras do conjunto de dados e usou uma árvore média para melhorar a precisão preditiva e controlar o ajuste excessivo. Ajustou-se os parâmetros Max depth (MD) que compreende a profundidade máxima da árvore na floresta, quanto mais profunda mais divisões ela tem, foi usado MD = 7. O n-estimators (NE) que representa o número de árvores na floresta, se entende que quanto maior o número de árvores que compõem a floresta, melhores serão os resultados, porém o tempo de execução do ajuste torna-se maior. Foi utilizado

um NE = 48. É importante observar que o ajuste desse parâmetro tende a um limite em que os resultados deixarão de ficar significativamente melhores.

Para verificar o grau de ajuste dos dados foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), enquanto que o ajuste do modelo foi avaliado pela raiz quadrada do erro-médio (RMSE - Root Mean Square Error).

Os demais parâmetros que compõe o modelo RF foram ajustados para o modo 'default' da biblioteca scikit-learn (versão 0.21), que opera com as melhores configurações gerais para predição dos resultados.

Após o treinamento do modelo, extrapolou-se espacialmente as concentrações de Gt e Hm para o planeta para os cenários atual, otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5), baseados no IPCC.

Utilizando dos dados da plataforma Chelsa, os cenários RCP 2.6, e RCP 8.6, foram criados a partir extração de dados de temperatura do ar e precipitação, do modelo bcc-csm1-1 (XIAO-GE et al., 2013). Com previsões para o intervalo de tempo entre 2041 a 2060.

O modelo bcc-csm1-1 foi desenvolvido pelo centro climático de Pequim (BCC) é um modelo de sistema climático acoplado incluindo atmosfera, oceano, superfície terrestre e gelo marinho. O modelo é rodado no Nacional Centro de Pesquisa Atmosférica (NCAR) acoplador versão 5 (XIAO-GE et al., 2013) e os resultados disponibilizados na plataforma Chelsa.

O modelo bcc-csm1-1 para o cenário otimista demonstrou aumento médio de 1 °C de T e redução média de 7.5 mm de P, enquanto no cenário pessimista a T aumenta em média 2 °C e a P aumenta em média 37.8 mm em relação ao cenário atual.

Após a extração das informações de T e P, os dados foram submetidos ao modelo RF para predição de valores de Hm e Gt. Em seguida foram elaborados mapas de previsões de teores da Hm e Gt para os cenários otimista e pessimista. Os mapas foram gerados ponto a ponto de uma imagem 43,200 X 20,880, totalizando 902016000 de pixels.

2.3 Resultados e Discussão

A análise de componentes principais (PCA) explicou 53% do sistema clima-solo. O componente principal 1 (PC1) representa 30% e o componente principal 2 (PC2) apresenta 23% da variação total (Figura 2). As variáveis mais importantes no sistema foram hematita no arenito, precipitação no arenito, goetita no arenito, temperatura no basalto e goetita no basalto.

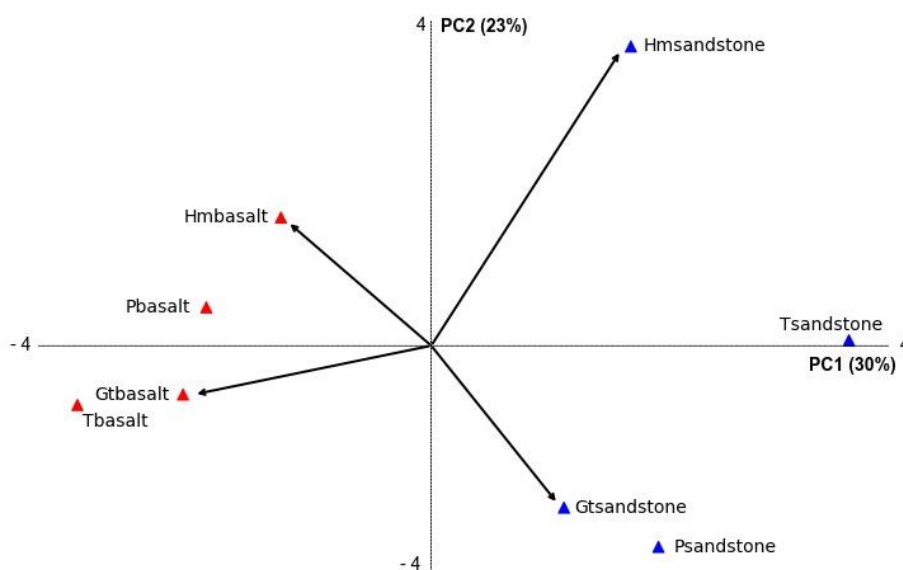


Figura 2. Análise de componentes principais com variáveis. Hematita e goetita, Precipitação e temperatura do ar referentes a solos de basálticos e de arenito. PC1 = componentes primários 1 e PC2 = Componentes primários 2.

A análise de PCA indica que a Hm e Gt são mais sensíveis em relação à T e P nos solos areníticos que nos basálticos. O PC1 pode ser denominado como componente do tipo de solo, já o PC2 como tipo de mineralogia. A T afeta mais a componente tipo de solo (PC1) e a P no tipo de mineralogia (PC2).

A goetita (Gt) apresenta uma correlação linear direta com a P, as concentrações de Gt tornam-se mais disponíveis, conforme aumenta o volume de P. A Gt é facilmente encontrada em países com solos altamente intemperizados (KETROT et al., 2013), de clima tropical e subtropical (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989), e apresentam maior sensibilidade em

solos formados a partir de rochas vulcânicas (SOUZA, 2010), em comparação às areníticas. Tanto em solos de formação basáltica como arenítica, a proporção em que aumenta a T as concentrações deste óxido diminuem (Figura 3).

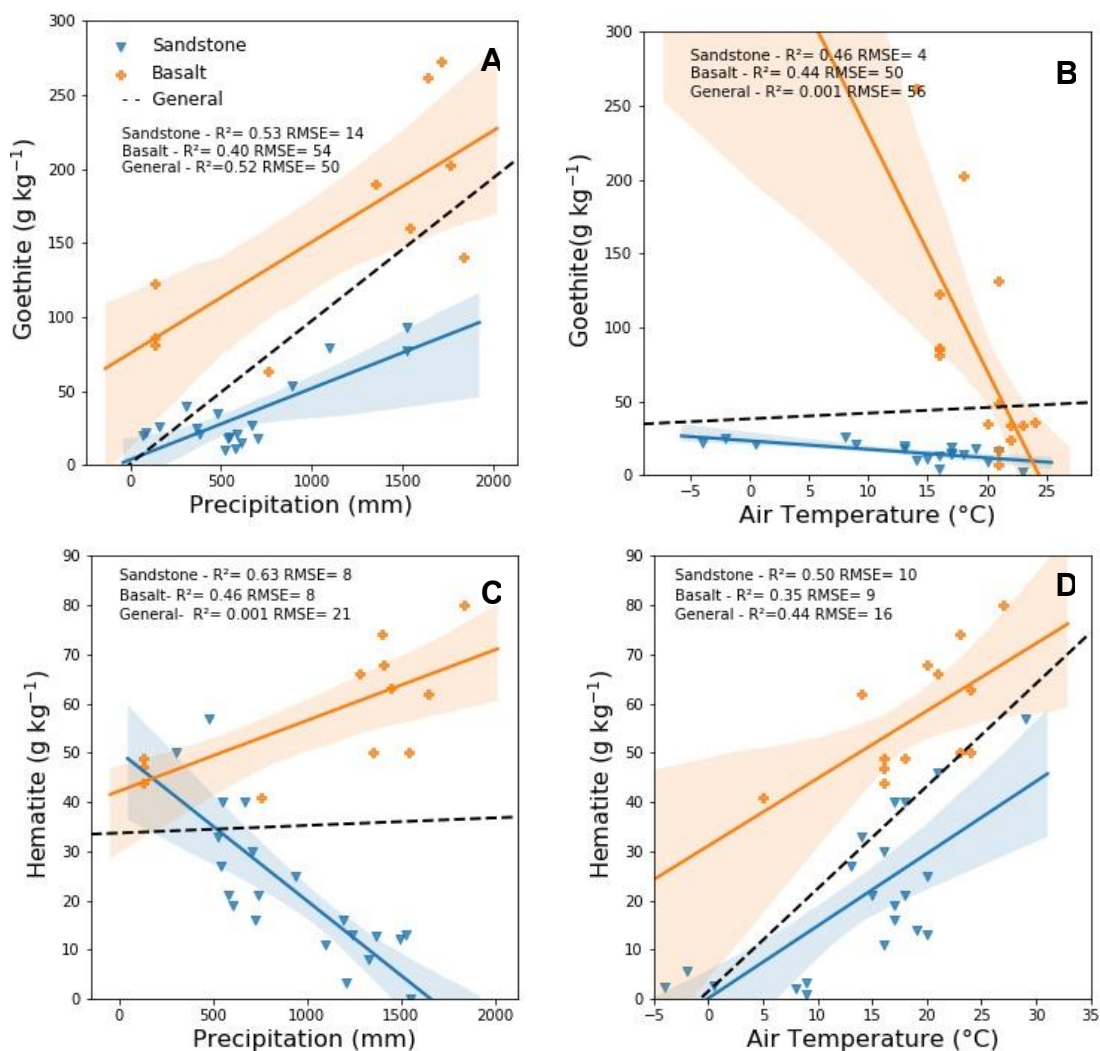


Figura 3 - Modelos lineares simples entre as concentrações de goetita e hematita a partir de dados regionais médios de 30 anos de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C). As áreas pintadas correspondem ao intervalo de confiança a 95% de probabilidade. As linhas tracejadas indicam o modelo médio entre solos areníticos e basálticos. As linhas marrons indicam solos basálticos, as linhas azuis os solos areníticos.

As concentrações destes minerais tanto em solos basálticos como areníticos, depende do total de ferro que é liberado durante o processo pedogênico (ZAGÓRSKI, KISIEL, 2018), ou seja, é determinado pelos minerais presentes nas rochas, que são desagregados e decompostos pelo

intemperismo. Sendo, a pedogênese ferralítica o principal processo do intemperismo, no qual ocorre a formação de microagregados, caracterizada por uma concentração óxidos de ferro que forma aglomerados mais vermelhos (Hm) ou amarelos (Gt).

Infere-se que quanto maior a P mais redutor é o ambiente, seja pelo acúmulo de água, pela água armazenada no solo, por conta da característica do solo, ou a forma da paisagem. Sempre que o ambiente é mais redutor preferencialmente vai formar mais Gt, mineral este de baixa cristalinidade. A Gt é, sensível a água o que caracteriza esta como um mineral cosmopolita.

A Gt forma-se no solo com uma maior facilidade devido a sua constante termodinâmica, ou seja, para que ocorra a cristalização deste mineral é necessário um ambiente químico favorável, e o material primário precisa ser rico em ferro. Sendo assim, a velocidade com que o material primário é quebrado, depende das condições de temperatura, termodinamicamente à temperatura do ar é produto de várias transformações deste mineral (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003).

Taylor e Graley (1967) observaram resultados semelhantes ao deste estudo, em solos no noroeste da Tasmânia, uma diminuição de Gt, quando a T aumenta de 9 °C a 12 °C e uma redução na P de 1650 para 1080 mm.

A mesma relação é feita por Schwertmann et al. (1982), em solos no sul da Alemanha, quando a T aumenta de 7,5° para 10,5 °C e a P diminui de 1000 para 600 mm, reduz as concentrações de Gt.

As concentrações de Hm diminuíram consideravelmente no momento em que aumenta a P em solos areníticos, enquanto que, nos solos basálticos houve um aumento da Hm a medida em que aumenta o volume da P, pois o predomínio de Hm em solos basálticos, está associado aos altos teores de minerais ferromagnesianos no material de origem (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1983).

Tanto nos solos basálticos como areníticos o aumento da T influencia positivamente na formação deste óxido, a esse resultado atribui-se a facilidade de desidratação da ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Infere-se que, em condições de altas T e baixa atividade da água, ocorre uma rápida decomposição da matéria orgânica e o ferro liberado pelo intemperismo não é complexado, no entanto é precipitado como ferrihidrita.

Evidenciando que a T elevada acelera o processo de desidratação da ferrihidrita, (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000) mostraram que a ferrihidrita se torna Hm a partir de 25 °C. Em condições opostas, de baixa T e alta P, a formação da Hm é anulada, dando preferência a Gt, visto que o acúmulo de compostos orgânicos impede a formação da ferrihidrita. A T baixa retarda a desidratação da ferrihidrita.

A goetita e hematita ocorrem tanto em solos de basalto quanto arenito, distribuído aleatoriamente entre grãos de quartzo e argilas minerais (VAN HOUTEN, 1973; SCHWERTMANN, 1993). No entanto, o basalto favorece a formação de Hm devido aos altos teores de ferro em relação ao arenito (CURI; FRANZMEIER, 1987; TORRENT; BARRÓN, 2002).

Em solos de basalto, a maior concentração de Hm verificada nos artigos analisados foi de 80 kg ha⁻¹, relacionada a uma P de 1834 mm e T de 27 °C, enquanto que no arenito P de 482 mm e T de 29 °C favoreceram esse mineral, a uma concentração de 57 g kg⁻¹.

Kämpf e Schwertmann (1983) descreveram que em solos brasileiros, quando a T é menor que 15 °C, a Gt era o único óxido de ferro presente no solo, quando entre 15,5 °C e 17,5 °C a Hm aumentou rapidamente.

Foi verificado que as concentrações de Gt e Hm mudam conforme os locais estudados, explicando que a variação nas concentrações destes minerais está geralmente associada ao ambiente onde o solo está se formando (SCHWERTMANN, 1985). Sendo, a formação destes óxidos no solo influenciado pela posição na paisagem, além do material de origem (CURI, 1983; SANTANA, 1985). Neste sentido, as características dos pedoambientes, como forma da curvatura e sua posição na paisagem podem estagnar ou não a água (GHIDIN et al., 2006) e afetar as características cristalográficas destes minerais. Camargo et al. (2008) confirmou ao analisar atributos mineralógicos da fração argila sob diferentes formas de relevo, em Guariba – SP, que nos pedoambientes de forma convexo-côncavas há uma maior concentração de goetita e hematita de baixa cristalinidade, comprovada pelos baixos valores de diâmetro médio dos cristais (DMC). Enquanto que, nas posições lineares são mais cristalinos. Explicando então, que em uma área côncava a água fica estagnada durante um maior tempo nas posições mais estáveis da paisagem (RAWLS; PACHEPSKY, 2002). Como consequência há reações químicas e transporte de sólidos ou de materiais em

solução, produzindo efeitos diretos nos atributos mineralógicos (GHIDIN et al., 2006).

Montanari et al. (2010) observaram também, maiores concentrações de goetita na pedoforma côncava, confirmando os resultados deste estudo que indica que este mineral oxida com maior facilidade na presença de água. O autor identificou, ainda que os maiores teores de hematita foram na pedoforma linear, refletindo esse resultado as boas condições de drenagem favorecida pela pedoforma linear em comparação ao ambiente da pedoforma côncava (POCAY, 2000).

Os óxidos estudados provaram ser um aparato poderoso que reflete a intensidade com que o solo se forma e há evolução paleoclimática (BUGGLE et al., 2014), visto que, fatores do solo como pH, temperatura e teor de matéria orgânica influenciam na formação e estabilidade de Hm e Gt (JI et al., 2002). Conforme mostrou (ZHANG; HAN; XING, 1989) a goetita é o óxido de ferro dominante nas seções loess-paleosol do norte da China devido às condições locais úmidas, enquanto que no sul da China a hematita é dominante devido às condições quentes e sazonalmente secas (Hong et al., 2013).

Apesar dos óxidos de ferro serem considerados estáveis no solo ao longo do tempo, este estudo permitiu relacionar as concentrações de goetita e hematita com dados climáticos de 30 anos, com valor-p de $< 0,01$.

O gráfico de contorno confirmou que, em solos basálticos no mundo, quando P de 600 mm a 1000 mm e T maiores que 16 °C, há redução das concentrações de Gt. Em solos de formação arenítica, P entre 400 mm a 800 mm e T maior de 5 °C reduzem drasticamente os teores de Gt (Figura 4).

Quando as localidades têm P em torno de 250 a 600 mm e T maiores que 22 °C estas apresentam as melhores condições para a formação de Hm no basalto, enquanto que em arenitos com P maiores que 1900 mm e T inferior a 16 °C há diminuição rápida de Hm.

Schwertmann e Taylor (1989) comentaram que os solos originados do basalto, quando bem drenados, associados a elevado grau de intemperismo, a Hm é o mineral presente, em condições opostas a goetita é favorecida.

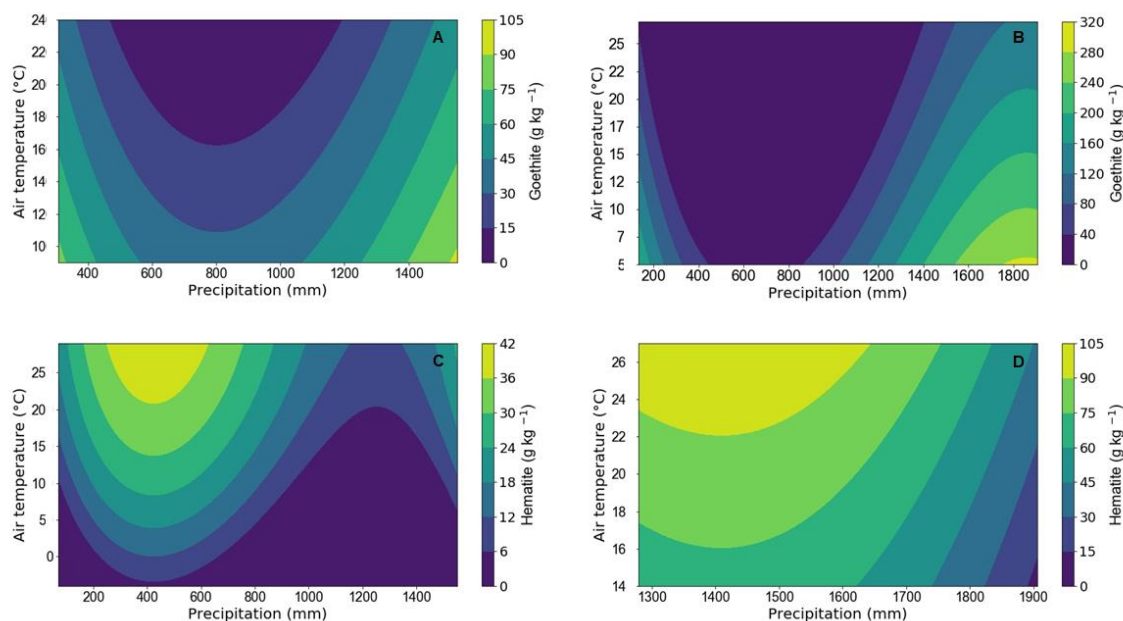


Figura 4. Goetita e Hematita relacionado à variação de temperatura do ar e precipitação em 50 localidades no mundo. A: goetita no Basalto; B: goetita no arenito; C: hematita no basalto; D: hematita no arenito.

O modelo Random forest demonstrou um bom desempenho na estimação dos teores de Gt e Hm para o mundo, o modelo obteve uma precisão de $R^2 = 0.85$, e uma acurácia com $RMSE = 22.35$.

Os mapas de distribuição de goetita no mundo, nos cenários atual, otimista e pessimista (Figura 5,6,7), apresentaram médias de $51,58 \text{ g kg}^{-1}$; $58,75 \text{ g kg}^{-1}$ e $64,76 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 11), respectivamente. Em um cenário otimista e pessimista de mudanças climáticas as concentrações deste óxido aumentaram, principalmente na América do Sul, África, parte da Oceania e Ásia. Em contrapartida, a distribuição de hematita nos cenários otimista e pessimista sofrem redução principalmente na América do Sul. A análise de distribuição dos dados mostra que a média de hematita nos cenários atual, otimista e pessimista (Figura 8,9, 10), são $37,60 \text{ g kg}^{-1}$; $40,53 \text{ g kg}^{-1}$ e $44,57 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 12), respectivamente. No entanto, é confirmado que a presença destes é uma característica marcante nos solos de clima tropical e subtropical.

Estes minerais são considerados pedoindicadores ambientais por refletirem as condições ambientais de sua formação e persistirem por longo tempo no solo (SCHWERTMANN; CARLSON, 1994; CORNELL;

SCHWERTMANN, 1996). Quantificar a hematite e goetita pedogênica é crucial para entender os processos de formação do solo e sua ligação com o clima (HU et al., 2013). Os resultados deste estudo corroboram que as mudanças climáticas podem interferir na disponibilidade de Gt e Hm, isto porque o clima (temperatura do ar, precipitação) é considerado um fator ativo de formação do solo, mostrando que a elevação da temperatura acelera a velocidade das reações do solo. Visto que o solo é um sistema aberto, e as mudanças que estão acontecendo nele são contínuas e geridas pelo clima, portanto quanto maior a precipitação e a temperatura mais rápido ocorrerá a pedogênese, e maiores serão as concentrações dos óxidos de ferro, além de serem resultados analisados em uma macroescala, onde as condições de T e P mudam consideravelmente de um local para outro.

A pesar dos óxidos de ferro serem considerados estáveis por longo tempo, estes têm apresentado diferenças no teor (SILVA NETO et al., 2008) e na cristalografia (INDA JUNIOR; KÄMPF, 2005). Isto porque a atuação dos fatores ao longo do tempo imprime características naturais que, somadas ao manejo acentuam essa variabilidade (BARBIERI et al., 2013).

Em duas áreas vizinhas, com históricos de manejo diferente, um com sistema de colheita mecanizada e sem queima (cana crua) durante sete anos; e outro com sistema de colheita manual e com queima (cana queimada) por trinta anos, Barbieri et al. (2013) demonstraram que a área de cana queimada apresenta baixos valores para o DMC de Hm em relação aos de cana crua que apresentaram maior cristalinidade. Com o processo de queima há uma maior concentração de calor influenciando na disponibilidade deste mineral, semelhante aos resultados encontrados neste estudo, onde as altas temperaturas do ar favoreceram a disponibilidade de Hm. O autor demonstrou também que o DMC da goetita nas duas áreas são semelhantes, uma vez que a Gt forma-se preferencialmente na presença de umidade.

Além disso, a atividade humana, como o desmatamento, mudança no uso da terra, e o preparo do solo podem degradar significativamente os solos e alterar a composição mineralógica deles (ITO, 2017).

Estes resultados carregam contribuições importantes, como adoção de zonas específicas de manejo de fósforo (P), com baixos custos de insumos e redução de impacto ambiental, visto que, óxidos de ferro regem a dinâmica de P

nos solos tropicais altamente intemperizados. Pois o P é adsorvido por grupos de superfícies hidroxilas em óxidos de ferro (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008). Os óxidos também contribuem com a adsorção de herbicidas, uma vez que a carga superficial destes minerais de argila é dependente do pH, e a adsorção é resultado da lixiviação iônica entre os minerais e o ânion do herbicida em níveis relativamente baixos de pH (GREEN, 1974; LOUX et al., 1989). Além de contribuir com a taxonomia de solos, pois permitem classificar, descrever e identificar os solos por meio da cor e das concentrações.

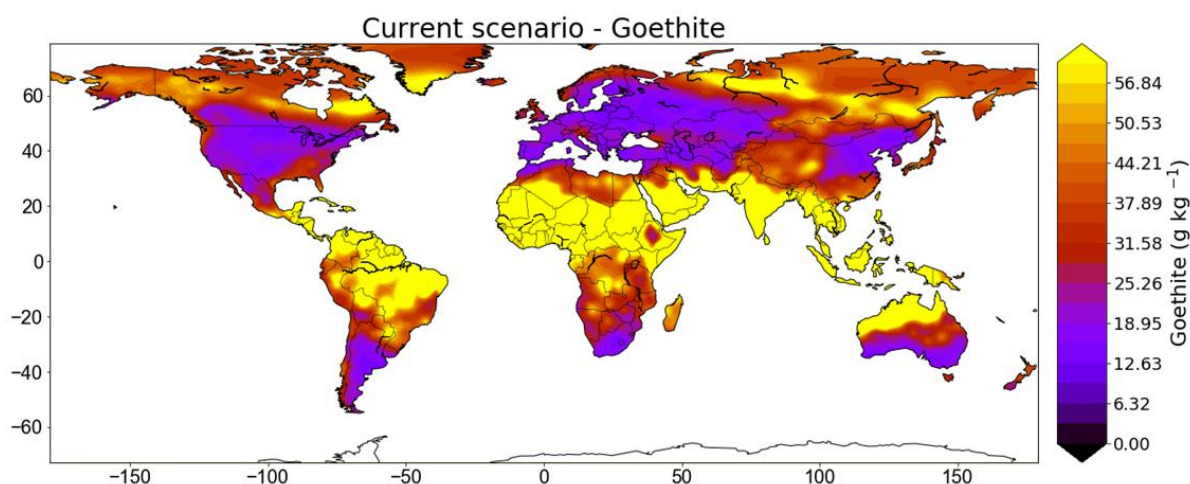


Figura 5. Cenário climático atual e distribuição e goetita.

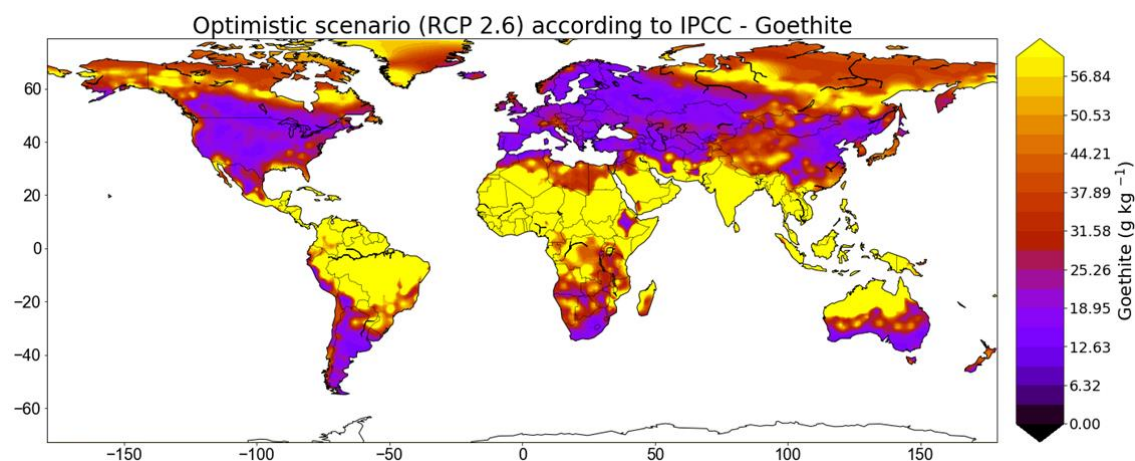


Figura 6. Cenário climático otimista de distribuição e goetita.

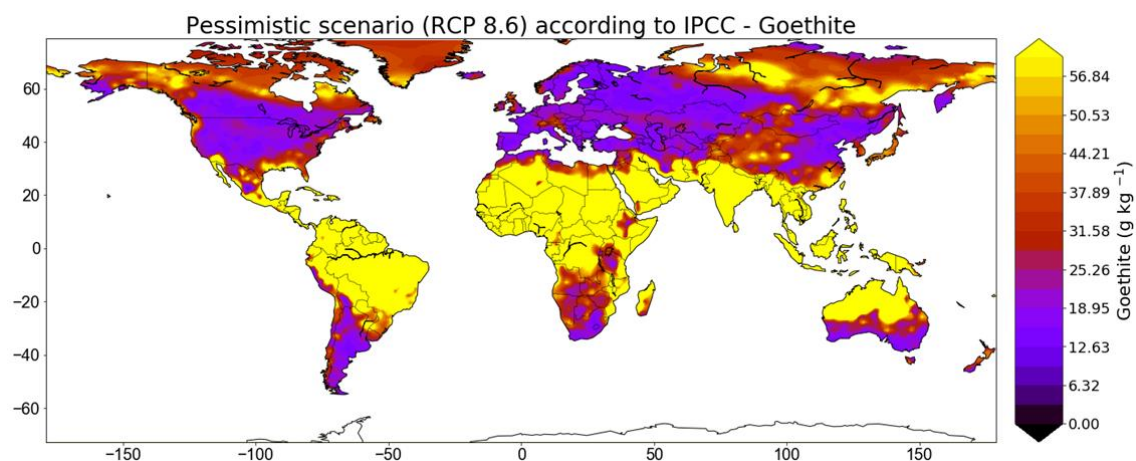


Figura 7. Cenário climático pessimista de distribuição e goetita.

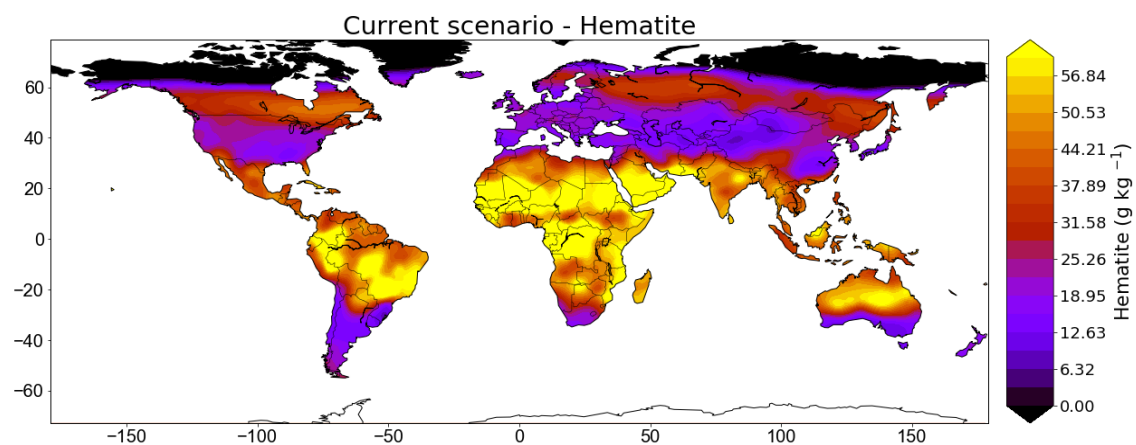


Figura 8. Cenário climático atual e distribuição de hematita.

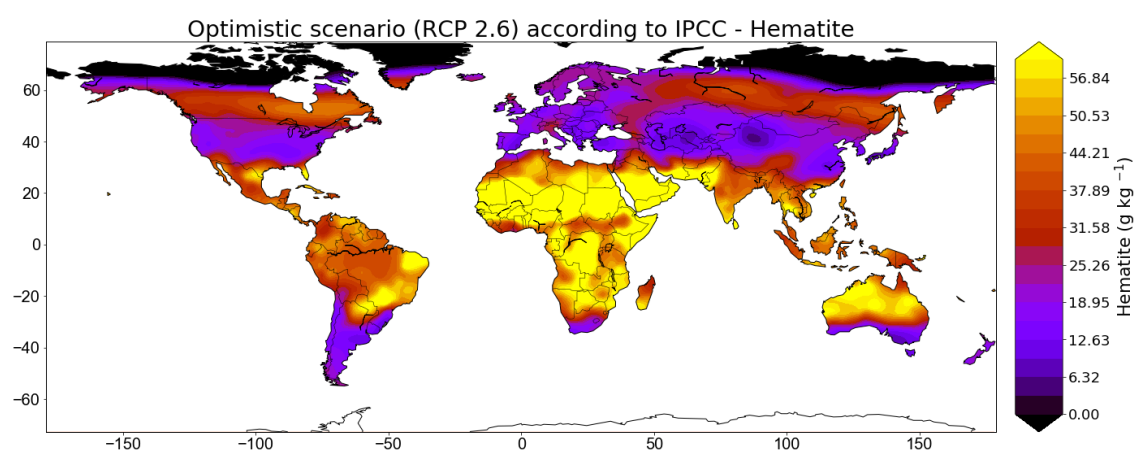


Figura 9. Cenário climático otimista e distribuição de hematita.

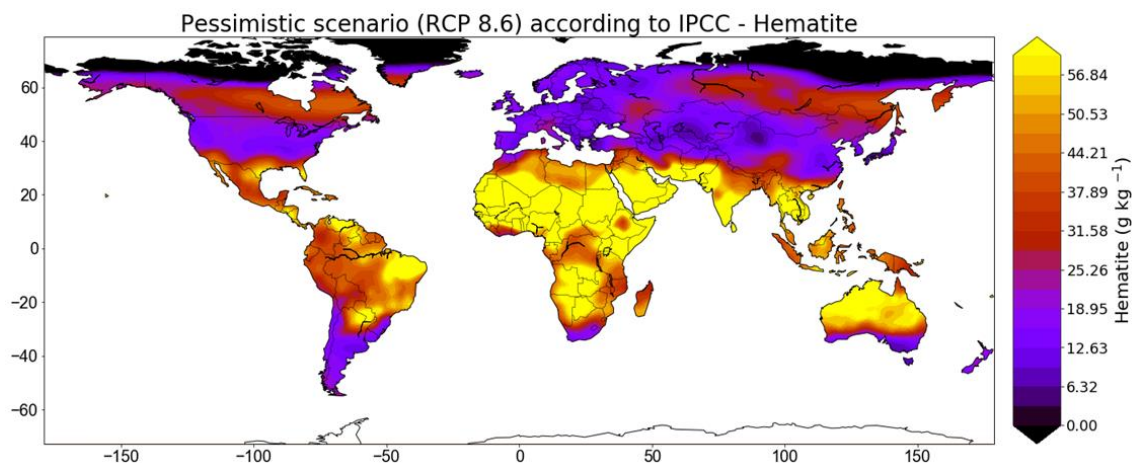


Figura 10. Cenário climático pessimista e distribuição de hematita.

Analisando a distribuição da previsão de goetita para o mundo com base nos cenários do IPCC (Figura 11), observou que os valores médios de goetita são bem próximos entre os cenários, porém com uma relativa diferença entre o cenário atual e o pessimista, esse comportamento se deve à maior dispersão dos dados, maior alongamento da cauda e redução dos outliers no cenário pessimista. Isso mostra os possíveis efeitos das variações na precipitação e temperatura.

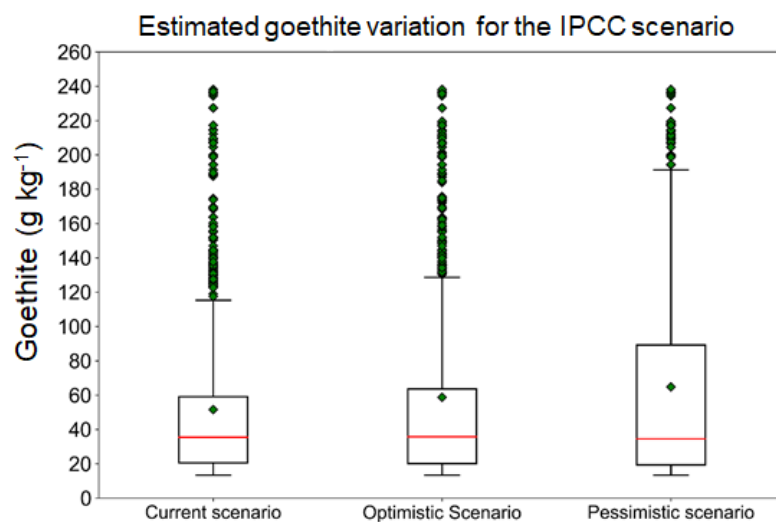


Figura 11. Boxplot da distribuição de Goetita para a condição atual, e cenários otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas.

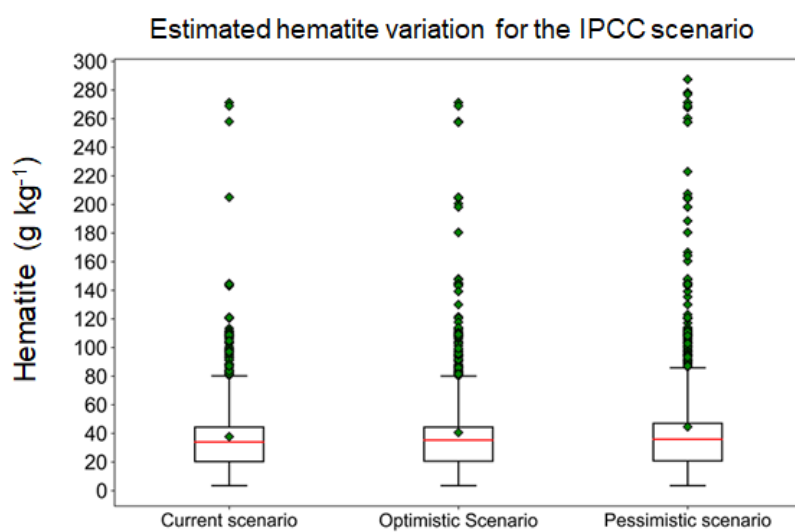


Figura 12. Boxplot da distribuição de Hematita para a condição atual, e cenários otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) de mudanças climáticas.

2.4 Conclusões

As concentrações de goetita e hematita nas várias regiões do mundo estão altamente ligadas às condições climáticas. Os solos basálticos apresentam maiores concentrações destes óxidos quando comparado aos solos areníticos.

A goetita apresenta sensibilidade em baixas temperaturas e altas precipitações, devido a sua maior estabilidade termodinâmica.

A principal variável climática que influencia na formação da hematita é a temperatura do ar e a baixa precipitação o que condiciona uma maior taxa de desidratação da ferrydrita.

O modelo Random Forest demonstrou bom desempenho para prever concentrações de goetita e hematita para o mundo, a partir de dados de temperatura do ar e precipitação.

A goetita sofre maior influência das mudanças climáticas que a hematita no mundo. O cenário pessimista (RCP 8.6), elaborado pelo IPCC, favorece o aumento da goetita no mundo.

REFERÊNCIAS

Abaka-Wood GB, Zanin M, Addai-Mensah J, Skinner W (2019) Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings–Part 1: Magnetic separation. **Minerals Engineering**, v. 136, p. 50-61.

Almeida CDS (2012) **Espacialização e quantificação de sesquióxidos de ferro (Goethita e Hematita) em solos tropicais por meio de sensoriamento remoto hiperespectral**. Dissertação (em Geociências Aplicadas) – UNB, Brasília.

Amundson R (2016) Soil Development: Conceptual and Theoretical Models. **International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: People, the Earth, Environment and Technology**, p. 1-11.

Barbieri DM, Marques Júnior J, Pereira GT, Siqueira DS, Panosso AR (2013) Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1557-1568.

Barrón V, Mello JWV, Torrent J (2000) Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 139-162.

Bomeni IY, Njoya A, Ngapgue F, Wouatong ASL, Fouateu RY, Kabeyene VK, Fagel N (2018) Ceramic with potential application of ngwenfon alluvial clays (noun, west cameroon) in building construction: Mineralogy, physicochemical composition and thermal behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 493-503.

Bortoluzzi EC, Pérez CA, Ardisson JD, Tiecher T, Caner L (2015) Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196-204.

Buggle B, Hambach U, Müller K, Zöller L, Marković, SB, Glaser B (2014) Iron mineralogical proxies and Quaternary climate change in SE-European loess–paleosol sequences. **Catena**, v. 117, p. 4-22.

Camargo LA, Júnior JM, Pereira GT, Alleoni LRF (2013) Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106.

Camargo LA, Marques Jr, Pereira GT, Alleoni LRF, Bahia ADS, Teixeira DDB (2016) Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 2, p. 172-182.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo: I-mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 2269-2277.

Cambardella CA, Moorman TB, Parkin TB, Karlen DL, Novak JM, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511.

Camêlo DDL, Ker JC, Fontes MPF, Corrêa MM, Costa ACSD, Melo VF (2017) Pedogenic iron oxides in iron-rich Oxisols developed from mafic rocks. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41.

Catoni M, D'Amico ME, Zanini E, Bonifacio E (2016) Effect of pedogenic processes and formation factors on organic matter stabilization in alpine forest soils. **Geoderma**, v. 263, p. 151-160.

Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 4, p. 287.

Chen C, Barcellos D, Richter DD, Schroeder PA, Thompson A (2019) Redoximorphic Bt horizons of the Calhoun CZO soils exhibit depth-dependent iron-oxide crystallinity. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 2, p. 785-797.

Cong Z, Gao S, Zhao W, Wang X, Wu G, Zhang Y, Ji J (2018). Iron oxides in the cryoconite of glaciers on the Tibetan Plateau: abundance, speciation and implications. **The Cryosphere**, v. 12, n. 10, p. 3177-3186.

Cornell RM, Schwertmann U (1996) **The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses**, Weinheim: Wiley VCH, 1996. 573 p.

Cornell R M, Schwertmann U (2003) **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses**. John Wiley & Sons.

CURI N (1983) Lithosequence and toposequence of Oxisols from Goiás and Minas Gerais states, Brazil. TESE (Agronomia) West Lafayette, Purdue University, 1983. 158p.

Curi N, Franzmeier DP (1984) Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 341-346.

Curi N, Franzmeier DP (1987) Effect of Parent Rocks on Chemical and Mineralogical Properties of Some Oxisols in Brazil 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 1, p. 153-158.

Dornelles EF, Kraisig AR, da Silva JA, Sawicki S, Roos-Frantz F, Carbonera R (2018) Artificial intelligence in seeding density optimization and yield simulation for oat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 183-188.

Egglseder MS, Cruden AR, Tomkins AG, Wilson SA, Dalstra HJ, Rielli A, Faivre D (2019) Tiny particles building huge ore deposits—Particle-based crystallisation in banded iron formation-hosted iron ore deposits (Hamersley Province, Australia). **Ore Geology Reviews**, v. 104, p. 160-174.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515-524.

Formenti P, Caquineau S, Chevaillier S, Klaver A, Desboeufs K, Rajot JL, Briois V (2014) Dominance of goethite over hematite in iron oxides of mineral dust from Western Africa: Quantitative partitioning by X-ray absorption spectroscopy. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 22, p. 12,740-12,754.

Fontes MPF, Weed B (1991) Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 4, p. 1143-1149.

Fitzpatrick RW, Schwertmann U (1982) Al-substituted goethite—an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v. 27, n. 4, p. 335-347.

Fellmann T, Witzke P, Weiss F, Van Doorslaer B, Drabik D, Huck I, Leip A (2018) Major challenges of integrating agriculture into climate change mitigation policy frameworks. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 23, n. 3, p. 451-468.

Ghidin AA, Melo VDF, Costa Lima V, Jonasson Costa Lima JM (2006) Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I- Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2.

GREEN RE (1974) **Pesticide-clay-water interactions**. In: GUELZI, W. D. (Ed.) Pesticides in soil and water. Madison: SSSA, 1974. p. 3-37.

Gomes RP (2017) **Gênese, mineralogia e dinâmica do fósforo nos solos do Planalto Ocidental Paulista**. Dissertação (Agronomia –Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009) **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora.

Hemming S, de Zwart F, Elings A, Righini I, Petropoulou, A (2019) Remote Control of Greenhouse Vegetable Production with Artificial Intelligence Greenhouse Climate, Irrigation, and Crop Production. **Sensors**, v. 19, n. 8, p. 1807.

Hengl T, de Jesus JM, Heuvelink GB, Gonzalez MR, Kilibarda M, Blagotić A, Guevara MA (2017) Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS one**, v. 12, n. 2, p. e0169748.

Hirsch F, Bonhage A, Bauriegel A, Schneider A, Raab T, Raab A, Gypser S (2019) The occurrence, soil parameters and genesis of rubified soils ('Fuchserden') of northeastern Germany. **Catena**, v. 175, p. 77-92.

Hong H, Gu Y, Yin K, Wang C, Li Z (2013) Clay record of climate change since the mid-Pleistocene in Jiujiang, south China. **Boreas**, v. 42, n. 1, p. 173-183.

HU P, LIU Q, TORRENT J, BARRÓN V, JIN C (2013) Characterizing and quantifying iron oxides in Chinese loess/paleosols: implications for pedogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*. v.369-370, p.271-283.

INDA JUNIOR AV, Kämpf N (2005) Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

Ito A, Kok JF (2017) Do dust emissions from sparsely vegetated regions dominate atmospheric iron supply to the Southern Ocean?. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 7, p. 3987-4002.

Ji J, Balsam W, Chen JU, Liu L (2002) Rapid and quantitative measurement of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequence by diffuse reflectance spectroscopy. **Clays and Clay minerals**, v. 50, n. 2, p. 208-216.

Kämpf N, Schwertmann U (1983) Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v. 29, n. 1, p. 27-39, 1983.

Karger DN, Conrad O, Böhner J, Kawohl T, Kreft H, Soria-Auza RW, Kessler M (2017) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. **Scientific data**, v. 4, p. 170122.

Ketrot D, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, Singh B (2013) Interactive effects of iron oxides and organic matter on charge properties of red soils in Thailand. **Soil research**, v. 51, n. 3, p. 222-231.

Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263.

Simpson RJS, Pearson K (1904) Report on certain enteric fever inoculation statistics. **The British Medical Journal**, p. 1243-1246, 1904.

Liu X, Wang Q, Deng J, Zhang Q, Sun S, Meng J (2010). Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 105, n. 3, p. 137-152.

LOUX MM, LIEBL RA, SLIFE FW (1989) Adsorption of imazaquin and imazethapyr on soils, sediments, and selected adsorbents. **Weed Sci.**, v. 37, p. 712-718.

Lu W, Zhao W, Balsam W, Lu H, Liu P, Lu Z, Ji J (2017) Iron Mineralogy and Speciation in Clay-Sized Fractions of Chinese Desert Sediments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 24.

LEAL FA, Miguel EP, Matricardi EAT, Pereira RS (2015) Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 233-249.

Mahmoudi E, Moore F, Asadi S (2018) Leached caps mineralogy and geochemistry as supergene enrichment fertility indicators, Meiduk and Parkam porphyry copper deposits, SW Iran. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 194, p. 198-209.

MEDEIROS SRR, Marin FR (2012) Avaliação de dados de radiação solar na escala diária modelada a partir de sensor remoto orbital para o Brasil. In: **Embrapa Informática Agropecuária-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: MOSTRA DE ESTAGIÁRIOS E BOLSISTAS DA EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA, 8., 2012, Campinas. Resumos... Brasília, DF: Embrapa.

Montanari R, Marques Júnior J, Campos MCC, Souza ZMD, Camargo A (2010) Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica**.

Montanari R, Souza GSA, Pereira GT, Marques J, Siqueira DS, Siqueira GM (2012) The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 5, p. 542-552.

Moore FC, Lobell DB (2015) The fingerprint of climate trends on European crop yields. **Proceedings of the National Academy of sciences**, v. 112, n. 9, p. 2670-2675.

Nawar S, Mouazen A (2017) Comparison between random forests, artificial neural networks and gradient boosted machines methods of on-line Vis-NIR spectroscopy measurements of soil total nitrogen and total carbon. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2428.

Pearson K (1904) **On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation; On the general theory of skew correlation and non-linear regression**. Cambridge University Press.

Pérez-Sirvent C, García-Lorenzo ML, Hernández-Pérez C, Martínez-Sánchez MJ (2018) Assessment of potentially toxic element contamination in soils from Portman Bay (SE, Spain). **Journal of soils and sediments**, v. 18, n. 6, p. 2248-2258.

POCAY VG (2000) **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar**. Dissertação (Agronomia) – FCAV, Jaboticabal.

Pearson K, Simpson,RJS (1904) Relatório sobre certas estatísticas de inoculação de febre entérica. **The British Medical Journal** , p. 1243-1246.

Ramaroson VH, Becquer T, Sá SO, Razafimahatratra H, Delarivière JL, Blavet D, Rakotondrazafy AF (2018) Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. **Catena**, v. 168, p. 102-109.

Ratié G, Vantelon D, Kalahroodi EL, Bihannic I, Pierson-Wickmann AC, Davranche M (2019) Iron speciation at the riverbank surface in wetland and potential impact on the mobility of trace metals. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 443-455.

Rauch, JN (2011) Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 110, n. 2, p. 193-201.

Rawls WJ, Pachepsky YA (2002) Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. **Soil Science**, v. 167, n. 7, p. 423-435.

Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Neumann K (2014) Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3268-3273.

SANTANA DP (1985) **Soil formation in a toposequence of Oxisols from Patos de Minas region, Minas gerais state, Brazil**. TESE (Agronomia) West Lafayette, Purdue University, 1984. 129p.

Schwertmann U (1993) Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. **Soil color**, n. soilcolor, p. 51-69.

Schwertmann U, Carlson L (1994) Aluminum influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminum substitution of natural goethites. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 256-261.

Schwertmann U, Kämpf N (1985) Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, v. 139, n. 4, p. 344-350.

Schwertmann U, Schulze DG, Murad E (1982) Identification of Ferrihydrite in Soils by Dissolution Kinetics, Differential X-ray Diffraction, and Mössbauer Spectroscopy 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 4, p. 869-875.

Schwertmann U, TAYLOR RM (1989) Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. Minerals in soil environments. 2. ed. Madison: **Soil Science Society of America**, p. 379–438.

Schwertmann U; Fechter H (1982) The point of zero charge of natural and synthetic ferrihydrites and its relation to adsorbed silicate. **Clay Minerals**, v. 17, n. 4, p. 471-476.

Schwertmann UTRM, Taylor RM (1989) Reginald M. Iron oxides. **Minerals in soil environments**, n. mineralsinsoile, p. 379-438.

Shah A, Dubey A, Hemnani V, Gala D, Kalbande DR (2018) Smart Farming System: Crop Yield Prediction Using Regression Techniques. In: **Proceedings of International Conference on Wireless Communication**. Springer, Singapore, 2018. p. 49-56.

Silva Junior JFD, Marques Júnior J, Camargo LA, Teixeira DDB, Panosso AR, Pereira GT (2012) Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro em diferentes pedoformas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1690-1703.

Silva LS (2016) **Mineralogia da fração argila dos solos do planalto ocidental Paulista**. Dissertação (Agricultura –Ciência do Solo) - UNESP, Jaboticabal.

Silva Neto LDFD, Inda Junior AV, Bayer C, Dick DP, Tonin AT (2008) Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista brasileira de ciencia do solo. Viçosa**. Vol. 32, n. 5 (set./out. 2008), p. 1873-1881.

Somelar P, Vahur S, Hamilton TS, Mahaney WC, Barendregt RW, Costa P (2018) Sand coatings in paleosols: Evidence of weathering across the Plio-Pleistocene boundary to modern times on Mt. Kenya. **Geomorphology**, v. 317, p. 91-106.

Souza Junior IG, Costal Cesar ACS, VilarII C, HoepersI A (2010) Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, v. 40, n. 3.

SPARKS DL (2003) Environmental Soil Chemistry. San Diego: **Elsevier Academic Press**, 352p.

Sposito G (2008) **The chemistry of soils**. New York: **Oxford University Press**, 321p.

Stackhouse PW, Westberg D, Chandler WS, Zhang T, Hoell JM (2017) Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) --- Agroclimatology Methodology (1. 0 Latitude by 1. 0 o Longitude Spatial Resolution).

Tao L, Li FB, Liu CS, Feng XH, Gu LL, Wang BR, Xu MG (2019) Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China. **Catena**, v. 174, p. 227-234.

Taylor RM, Graley AM (1967) The influence of ionic environment on the nature of iron oxides in soils. **Journal of soil science**, v. 18, n. 2, p. 341-348.

Taylor RM, Graley AM (1967) He influence of ionic environment on the nature of iron oxides in soils. **Journal of soil science**, v. 18, n. 2, p. 341-348.

Terra FS, Demattê JÁ, Rossel RAV (2018) Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma**, v. 318, p. 123-136.

Torrent J, Barrón V (2002) Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. **Encyclopedia of surface and Colloid Science**, v. 1, p. 1438-1446.

Torrent J, Guzman R (1982) Crystallization of Fe (III)-oxides from ferrihydrite in salt solutions: osmotic and specific ion effects. **Clay Minerals**, v. 17, n. 4, p. 463-469.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 198. p. 45-94.

Van Houten FB (1973) Origin of Red Beds A Review-1961-1972. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 1, n. 1, p. 39-61.

Van Meijl H, Havlik P, Lotze-Campen H, Stehfest E, Witzke P, Domínguez IP, Humpenöder F (2018) Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 064021.

Vidal Torrado P (2005) Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos em ciências do solo**, v. 4, p. 145-192.

VIEIRA SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53.

Vingiani S, Di Iorio E, Colombo C, Terribile F (2018) Integrated study of Red Mediterranean soils from Southern Italy. **Catena**, v. 168, p. 129-140.

Wilson SG, Lambert JJ, Nanzyo M, Dahlgren RA (2017) Soil genesis and mineralogy across a volcanic lithosequence. **Geoderma**, v. 285, p. 301-312.

Wisawapipat W, Kheoruenromne I, Suddhiprakarn A, Gilkes RJ (2010) Surface charge characteristics of variable charge soils in Thailand. **Soil Research**, v. 48, n. 4, p. 337-354.

Xiao-Ge XIN, Tong-Wen WU, Jiang-Long LI, Zai-Zhi WANG, Wei-Ping LI, Fang-Hua WU (2013) How well does BCC CSM1. 1 reproduce the 20th century climate change over China? **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, v. 6, n. 1, p. 21-26.

Yin K, Hong H, Algeo TJ, Churchman GJ, Li Z, Zhu Z, Lei W (2018) Fe-oxide mineralogy of the Jiujiang red earth sediments and implications for Quaternary climate change, southern China. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 3610.

Zagórski Z, Kisiel M (2018) Forms of iron in parent rocks of soils developed from Lower Triassic (Buntsandstein) deposits in the NE part of the Holy Cross Mountains (Poland). **Soil Science Annual**, v. 69, n. 4, p. 259-271.

Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Jafari A, Tajik S, Finke P (2019) Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. **Geoderma**, v. 338, p. 445-452.

Zhang H, Han Y, Xing G (1989) Study On the Iron Oxides for Torrid Red Earths by Using the Mossbauer Spectroscopy. **Acta Pedologica Sinica** (in Chinese with English abstracts). 26, 316–323.

Zhou L, Xiu F, Qiu M, Xia S, Yu L (2017) The adsorption and dissociation of water molecule on goethite (010) surface: A DFT approach. **Applied Surface Science**, v. 392, p. 760-767.