



UFAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



CECA

JULIA DE OMENA

Adsorção de Fósforo e sua Relação com os Atributos de Solos de Alagoas

RIO LARGO – AL

2022

JULIA DE OMENA

Adsorção de Fósforo e sua Relação com os Atributos de Solos de Alagoas

Monografia apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharela em Agronomia.

Orientador: Profº. Drº Gilson Moura Filho.

RIO LARGO – AL

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

O55a Omena, Julia de.

Adsorção de fósforo e sua relação com os atributos de solos de Alagoas. / Julia de Omena. – 2022.

33f.: il.

Orientador(a): Gilson Moura Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2022.

Inclui bibliografia

1. Adsorção de fósforo. 2. solos de Alagoas. 3. P-Remanescente. I. Título.

CDU: 981.35: 631.4

À minha mãe, Macicleide da Silva de Omena, por ser minha fonte de inspiração.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pai todo poderoso, pela segurança do seu amor e a certeza que está comigo.

À minha mãe, Macicleide da Silva de Omena, por seu esforço para que eu alcançasse o conhecimento.

À minha avó, Maria Helena da Silva de Omena, e minha tia, Mary Cristiany da Silva de Omena, por tanto amor e ensinamentos durante toda a minha vida.

Ao meu irmão, Eric Silva de Omena, pelo incentivo.

Aos demais familiares que estiveram presentes e me incentivaram durante a minha caminhada.

Aos meus padrinhos pelo incentivo.

À Paula Larissa Vieira da Silva, pelo estímulo, paciência, companheirismo e por estar ao meu lado fazendo acreditar num futuro esplêndido.

Aos amigos e colegas, que fiz durante a graduação e aos de longa data, pelo incentivo.

Ao meu orientador, amigo e professor Dr. Gilson Moura Filho, pelo apoio, aprendizado, paciência e momentos de descontração.

À amiga e professora Dra. Leila Cruz da Silva Calheiros, pelo incentivo, amizade e por tanto ensinamento.

Aos demais que fazem e fizeram parte do Laboratório de Solos, Água e Planta (LABSAP) pelo apoio e auxílio.

À Universidade Federal de Alagoas, ao Centro de Engenharias e Ciências Agrárias e todos os seus funcionários.

Aos professores que tive a oportunidade de ter recebido os seus ensinamentos, principalmente, os professores do IFAL – *campus* Satuba que me incentivaram na escolha de cursar Agronomia.

E a todos que contribuíram com seus incentivos durante essa caminhada para que eu me tornasse Engenheira Agrônoma.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: mapa de localização dos municípios onde as amostras de solo foram coletadas.....	16
Figura 2: isothermas linearizadas de Langmuir das amostras de solo.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: grupos de solos de acordo com os valores de P-remanescente.....	18
Tabela 2: classificação, localização e atributos químicos das amostras de solo.....	19
Tabela 3: atributos físicos das amostras de solo.....	20
Tabela 4: teores de ferro e alumínio cristalinos e amorfos das amostras de solo.....	21
Tabela 5: fósforo remanescente (P-Rem) das amostras de solo.....	22
Tabela 6: equações da isoterma de Langmuir.....	26
Tabela 7: índice de desempenho estatístico para o modelo de Isoterma de Langmuir, 2ª região linearizada.....	27
Tabela 8: resultados da análise estatística, obtidos por correlação, regressão e teste t, em que a CMAP é a variável correlacionada com os demais atributos das amostras de solo.....	28

RESUMO

A baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos do estado de Alagoas, mostra quanto é importante o estudo do comportamento desse elemento no solo. A recomendação de adubação de fosfatos, para as culturas no estado de Alagoas, tem sido feita sem levar em consideração as características de adsorção desses solos. O objetivo desse trabalho é conhecer os valores da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) e as relações com os demais atributos dos solos para definir as doses de P a serem aplicadas nas culturas. Nesse sentido foram coletadas onze amostras de solos representativas das regiões do Sertão, Agreste e Litoral Alagoano, na camada de 0-20 cm, para determinação dos atributos físicos (areia, silte e argila), atributos químicos (pH, P, K, Na, Ca, Mg, H+Al, matéria orgânica, CTC), P remanescente, diferentes formas de Fe e Al e os valores de CMAP definida pela isoterma de Langmuir. Foram feitas correlações e regressões entre os valores da CMAP com os demais atributos físicos e químicos dos solos. Os resultados mostraram que os valores de CMAP situaram-se 999,0 a 133,0 mg kg⁻¹ de P no solo. Os atributos dos solos que apresentaram correlação significativa com a CMAP foram o P-Remanescente, a Matéria Orgânica, a Capacidade de Troca de Cátions (CTC), acidez potencial (H+Al), Argila e os teores de Fe e Al complexados por Matéria Orgânica. Portanto, estimam o valor da CMAP e influenciam no comportamento do fósforo no solo.

Palavras Chave: adsorção de fósforo; solos de Alagoas; P-Remanescente.

ABSTRACT

The low availability of phosphorus (P) in soils in the state of Alagoas shows the importance of studying the behavior of this element in the soil. The recommendation of phosphate fertilization for crops in the state of Alagoas has been made without taking into account the adsorption characteristics of these soils. The objective of this work is to know the values of the Maximum Phosphorus Adsorption Capacity (MPAC) and the relationships with the other soil attributes to define the P rates to be applied in the crops. In this sense, eleven soil samples representing the regions of Sertão, Agreste and Litoral Alagoano were collected, in the 0-20 cm layer, to determine the physical attributes (sand, silt and clay), chemical attributes (pH, P, K, Na, Ca, Mg, H⁺Al, organic matter, CEC), remaining P, different forms of Fe and Al and MPAC values defined by the Langmuir isotherm. Correlations and regressions were made between the MPAC values and the other physical and chemical soil attributes. The results showed that the MPAC values ranged from 999.0 to 133.0 mg kg⁻¹ of P in the soil. Soil attributes that showed a significant correlation with MPAC were P-Remaining, Organic Matter, Cation Exchange Capacity (CEC), potential acidity (H⁺Al), Clay and Fe and Al contents complexed by Organic Matter. Therefore, they estimate the value of MPAC and influence the behavior of phosphorus in the soil.

Keywords: adsorption of phosphorus; soil of Alagoas; remaining P.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 O estado de Alagoas	12
2.2 Fósforo.....	12
2.3 Isoterma de Adsorção	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Coleta e Preparo das Amostras de Solo.....	16
3.2 Determinação de Análise Granulométrica e de Fertilidade das Amostras de Solo..	16
3.3 Determinação dos Teores de Fe e Al Cristalinos e Amorfo das Amostras de Solo	19
3.3.1 Determinação de Fe e Al pela Solução Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB).....	19
3.3.2 Determinação de Fe e Al pela Solução de Oxalato de Amônio	20
3.3.3 Determinação de Fe e Al pela Solução de Pirofosfato de Sódio	20
3.4 Determinação do P-remanescente das Amostras de Solo.....	20
3.5 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP).....	22
3.6 Construção das Isotermas de Adsorção	22
3.7 Correlações, Regressões e Desempenho Estatístico dos Valores Obtidos	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÕES.....	30
REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um macronutriente primário fundamental para o desenvolvimento das plantas, pois influencia em vários processos celulares, tais como fotossíntese, respiração celular, transferência e armazenamento de energia e crescimento celular. A carência de P em solos está relacionada à baixa concentração nas rochas de origem a estes solos, grau de intemperismo e a sua fixação aos coloides. Dentre os fatores que afetam a disponibilidade de fósforo para as plantas, destaca-se a absorção específica ou quimiossorção, onde o fosfato presente no solo reage com os óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Além disso, a composição mineralógica dos solos, variações no pH e na quantidade de matéria orgânica influenciam nesse processo (CHAVES *et al.*, 2007; CARNEIRO *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2015).

Nem todo o P aplicado ao solo fica disponível para as plantas, pois parte do nutriente pode ser fixado ao solo, processo conhecido como adsorção de P. Esse fenômeno pode ser influenciado por parâmetros físicos e químicos (CORRÊA *et al.*, 2011). A textura do solo, por exemplo, interfere significativamente na disponibilidade de P no solo. Machado *et al.* (2011) observaram que a disponibilidade de P diminui ao longo do tempo, sendo mais evidenciado no solo de textura média, seguido pelo de textura argilosa, e por último, pelo solo de textura arenosa.

O teor de argila é um dos principais atributos para indicar a adsorção de P no solo. Dentre os componentes da fração argila, a goethita e caulinita mostraram maior correlação com a adsorção de P (BAHIA FILHO *et al.*, 1983; MOREIRA *et al.*, 2006). Contudo, outros atributos químicos também se correlacionam, como acidez potencial (H+Al), teores de ferro (Fe) e alumínio (Al) presentes no solo, pH, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC), capacidade de campo (CC) e saturação por bases (V%). Vários atributos podem influenciar a adsorção de P, e consequentemente, o P disponível na solução do solo, onde as plantas absorvem o nutriente para o seu desenvolvimento (MOREIRA *et al.*, 2006; VILAR *et al.*, 2010; CORRÊA *et al.*, 2011).

Nesse contexto há poucos estudos envolvendo os solos do estado de Alagoas, no tocante a sua capacidade máxima de adsorção de fosfatos (CMAP) e suas relações com os demais atributos dos solos. Esses estudos são fundamentais para a definição doses de P para as culturas cultivadas na região, como também o entendimento da ocorrência de fixação de P pelos solos. A maioria dos trabalhos envolvem solos da região do cerrado, com características químicas e mineralógicas bem diferentes dos solos do estado de Alagoas.

Existem alguns métodos adotados para a estimativa da adsorção de P no solo dentre eles destacam-se: CMAP, no qual pode ser calculada, pela isoterma de Langmuir para descrever quantitativamente a adsorção de fosfato à superfície dos minerais (OLSEN e WATANABE, 1957), o P remanescente (P-Rem), usado como estimador da CMAP (ALVAREZ V. *et al.*, 2000), energia de adsorção de fosfato (K_L). Segundo CORREA *et al* (2011) a CMAP e o P-Rem são variáveis confiáveis para se caracterizar a adsorção de P pelos solos. Pela sua simplicidade e praticidade, a variável P-Rem é a mais indicada para determinar adsorção de P nos solos.

Para compreender a adsorção são usadas as chamadas isotermas de adsorção, que são equações matemáticas usadas para descrever, em termos quantitativos, a adsorção de solutos por sólidos. Uma isoterma de adsorção mostra a quantidade de um determinado soluto adsorvida por uma superfície adsorvente, em função da concentração de equilíbrio do soluto. Dentre as isotermas conhecidas destacam-se os modelos de Langmuir.

A técnica usada para gerar os dados de adsorção é, a princípio, bastante simples, pois uma quantidade conhecida do soluto é adicionada ao sistema contendo uma quantidade conhecida de adsorvente. Admite-se que a diferença entre a quantidade adicionada e a remanescente na solução encontra-se adsorvida na superfície adsorvente (CORRÊA *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.* 2014).

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar os atributos físicos e químicos de onze amostras de solos do estado de Alagoas, determinar o P-Rem, aplicar os valores a isoterma de Langmuir para quantificar a adsorção de P, determinar a CMAP, determinar os teores de Fe e Al cristalinos e amorfos. E, correlacionar os dados obtidos de CMAP com os atributos em estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O estado de Alagoas

Localizado na Região Nordeste do Brasil, o estado de Alagoas compreende uma área de aproximadamente 27.830,656 km², correspondendo cerca de 0,32% do território nacional. Limita-se ao norte e oeste com o Estado de Pernambuco, ao sul com os Estados de Sergipe e Bahia e a leste com o Oceano Atlântico. É composto por 102 municípios e dividido em três mesorregiões: Leste, Agreste e Sertão (IBGE, 2020).

Formado por uma diversidade de ambientes, resultantes de variações climáticas, geológicas, de cobertura vegetal e da natureza morfológica, física, química e mineralógica dos seus solos.

Em Alagoas, prevalece na zona costeira, clima quente e úmido e vegetação florestal. No interior, no Sertão, vigoram condições de clima semiárido, com vegetação caatinga. Em consequência verifica-se uma grande variação de solos do litoral para o interior. O relevo do Estado varia de plano a montanhoso com predomínio de áreas com topografia e superfícies similares na faixa costeira. Quanto à geologia, predominam rochas cristalinas (gnaisses, granitos e xistos), destacando-se no litoral, os sedimentos do Grupo Barreiras (JACOMINE, 1975).

De acordo com os resultados do Levantamento Exploratório e Reconhecimento dos Solos do Estado de Alagoas de JACOMINE *et al.* (1975) e a atual classificação do SiBCS (2018) na mesorregião leste do estado predominam os Argissolos e Latossolos, os quais são utilizados comumente com a cultura da cana-de-açúcar. Na mesorregião do sertão, na parte oeste do Estado, destacam-se os solos das classes Neossolos, Planossolos e Luvisolos. Na faixa da mesorregião do Agreste, são importantes os solos das classes Latossolos, Planossolos, Argissolos, Luvisolos e Neossolos. A atividade principal, destas duas últimas áreas, relaciona-se com a pecuária extensiva de gado de corte e semiextensiva de gado leiteiro.

2.2 Fósforo

O Fósforo (P) do solo tem sua origem no mineral acessório chamado genericamente apatita, que pode ter origem ígnea, metamórfica ou sedimentar. O intemperismo leva-o à solução do solo, de onde as plantas o extraem e depois servem ou não como alimento para microrganismos e animais cujos restos devolvem-no ao solo parcialmente. A maioria dos solos brasileiros possuem baixos teores de P, sendo a erosão um dos fatores que quebra o ciclo roubando o fósforo e outros elementos do sistema solo-planta (MALVOLTA, 2006).

No solo, o P pode ser encontrado em diferentes formas, cuja predominância depende de vários fatores como, manejo e tipo do solo. O P no solo pode ser dividido em quatro amplas categorias: P na forma iônica e em compostos na solução do solo; P adsorvido na superfície dos constituintes minerais do solo; minerais cristalinos e amorfos de P; e P componente da matéria orgânica (BARBER, 1995).

Entre os macronutrientes, o fósforo é aquele absorvido em menor quantidade pelas plantas (RAIJ, 1991). O fósforo da planta e do solo, presente como fosfato (HPO_4^{-2}), é um elemento integral de importantes compostos da planta, incluindo açúcares-fosfato, fosfolipídios de membranas, nucleotídeos usados como fonte de energia (ATP) e nos ácidos nucleicos (TAIZ & ZEIGER, 2004).

A sua participação nas plantas acelera a formação das raízes e é essencial para o funcionamento como apoio mecânico e órgão de absorção da água e de íons; proporciona maior pregamento da florada e, por isso, maior frutificação; regulador de maturação; maior viabilidade das sementes; quando deficiente causa menor vegetação e produção, qualidade e senescência precoce (MALAVOLTA, 2006).

O crescimento e o desenvolvimento de plantas submetidas à deficiência de P são reprimidos desde os estádios mais iniciais da plântula, podendo continuar durante o desenvolvimento de sementes e frutos. Sob condições limitantes de P, as plantas normalmente apresentam pequeno desenvolvimento de raízes, coloração verde escura das folhas mais velhas associada ao acúmulo de antocianina e, assim, apresentando uma cor púrpura (STAUFFER, 2004).

Há diferenças entre solos, quanto à eficiência de utilização de fósforo pelas plantas, relacionadas com o processo de adsorção (FARDEAU, 1996). NOVAIS *et al.* (2007) definem adsorção como sendo a indicação de “reações químicas e mesmo físicas que ocorrem em interfaces, definidas como a superfície de separação de duas fases”. A retenção de P engloba fenômenos como a adsorção e a difusão de P, processo pelo qual o P é inserido lentamente no interior dos minerais ao quais está adsorvido.

O fósforo adsorvido pelas plantas vem da solução do solo, mas apenas pequenas quantidades dele estão presente na solução. BEZERRA *et al.* (2013) afirmam que existe um equilíbrio químico entre as formas de fósforo em solução e fracamente ligadas aos minerais do solo e matéria orgânica (P lábil). Assim que o fósforo é retirado da solução do solo, vai sendo

reabastecido de maneira a manter o equilíbrio. Com o passar do tempo, formas mais estáveis de fósforo são formadas, aumentando a quantidade de P não lábil.

Solos intemperizados que apresentam altos teores de argila e altos teores de óxidos de ferro e alumínio em sua constituição mineralógica, estes componentes formam ligações covalentes, de elevada energia, com o fósforo presente no solo. Diante dessa influência, o fósforo é considerado praticamente imóvel no perfil do solo, não estando sujeito à lixiviação. Já os solos mais arenosos, com menores teores de óxidos de ferro e alumínio, têm essa tal mobilidade reduzida, tornando-se mais disponíveis (CASAGRANDE; SOARES, 2007).

Uma das características usadas para avaliar o grau de interação do P com os sólidos do solo é a Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP), estimada por isotermas de adsorção. Segundo WOODRUFF & KAMPRATH (1965), o valor da CMAP dos solos tem sido usado como uma estimativa da quantidade desse nutriente requerida pelos solos para condicionar o crescimento máximo das plantas.

Para essa determinação, as amostras de solo são submetidas às variadas concentrações de fósforo, após está prática obtém-se a CMAP por meio do ajuste matemático. Dessa forma, a CMAP, basicamente, pode ser correlacionada com atributos químicos (CTC, pH, M.O., V%, P-remanescente, entre outros) e com atributos físicos (teores das partículas sólidas do solo).

2.3 Isoterma de Adsorção

A representação matemática dos mecanismos de adsorção e precipitação tem sido realizadas através de isotermas de adsorção, que descrevem quantitativamente a adsorção de solutos à superfície de sólidos, sob condições constantes de temperaturas e pressão, mostrando a quantidade de adsorvato sorvido em função de uma concentração de equilíbrio (BOHN *et al.*, 1985).

De acordo com BARROW (1978), há duas razões para utilizar modelos que descrevem a adsorção no solo. A primeira é que possibilita a expressão numérica das propriedades do solo e, na segunda, que permite conhecer mais a respeito da natureza dos processos de adsorção.

As equações têm a vantagem de fornecer parâmetros que possam ser relacionadas com propriedades dos solos (NASCIMENTO & FONTES, 2004). A isoterma de Langmuir, dada pela equação:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Em que q_e : quantidade de fosfato em equilíbrio (mg g^{-1}); q_m : capacidade máxima de adsorção de fosfato (mg g^{-1}); K_L : constante associada à energia de adsorção (mg L^{-1}); C_e : concentração do fosfato em equilíbrio (mg L^{-1}), foi usada pela primeira vez por OLSEN & WATANABE (1957) para descrever a adsorção de P pelo solo.

A teoria de Langmuir se baseia no fato da adsorção ocorrer em sítios uniformes com recobrimento em monocamada e afinidade iônica independentemente da quantidade de material adsorvido (ARTIKINS, 1994). Fornece a capacidade máxima de adsorção (q_m) do soluto pelo solo e o coeficiente (K_L) relacionado à energia de ligação desse íon em tais substratos (SHUMAN, 1988).

A maior vantagem dessa isoterma é que a CMAP e a constante relacionada com a energia de adsorção podem ser relacionadas com várias propriedades do solo, que fornecerão informações sobre a natureza da reação entre o solo e o fertilizante fosfatado (OLSEN & WATANABE, 1957; NOVAIS & SMYTH, 1999).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta e Preparo das Amostras de Solo

Foram coletadas, com o auxílio de um trado holandês de inox, onze amostras compostas de solo na profundidade de 0 a 20 cm em locais de mata nativa, nos municípios do Estado de Alagoas: Pariconha, Mata Grande, Penedo, Piranhas, Coruripe, Arapiraca, São Miguel dos Campos, São Sebastião, União dos Palmares, Rio Largo e Joaquim Gomes (Figura 1). As amostras foram devidamente identificadas e secas à 60 °C em estufa de ventilação forçada de ar por 4 dias. Em seguida foram passadas em peneira de 10 mesh e acondicionadas em sacos plásticos para posterior realização das análises.

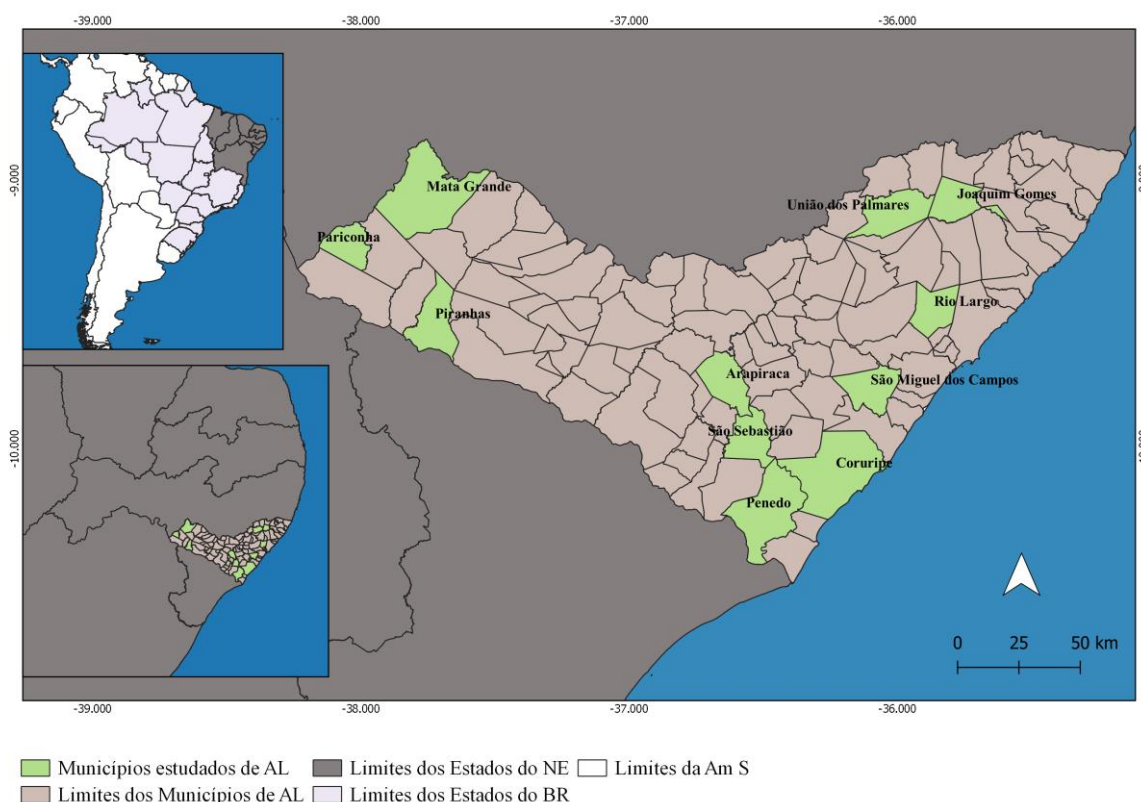


Figura 1 - Mapa de localização dos municípios onde as amostras de solo foram coletadas.

3.2 Determinação de Análise Granulométrica e de Fertilidade das Amostras de Solo

As determinações foram feitas seguindo os procedimentos adotados no Laboratório de Solo, Água e Planta (LABSAP) do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Foram feitas determinações de análise granulométrica pelo método do densímetro de Bouyoucos para conhecer os teores de argila, com o uso de diferentes peneiras foi possível

encontrar os teores de areia fina e areia grossa e os teores de silte foram determinados pela diferença dos teores, já encontrados, das demais partículas.

Nas determinações de fertilidade das amostras de solos foi medido o pH em água (1:25). Os teores de P, de potássio (K) e de sódio (Na) foram determinados em extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997), em que o fósforo disponível foi dosado por colorimetria (BRAGA E DEFELIPO, 1974) e os cátions trocáveis K e Na foram determinados por fotômetro de chama. A acidez potencial (H+Al) foi feita indiretamente com leitura de pH com a solução tampão SMP. Os elementos trocáveis cálcio (Ca), magnésio (Mg) e Alumínio (Al) foram extraídos com solução de cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado por titulometria de neutralização (EMBRAPA, 1997). A matéria orgânica foi feita pelo método colorimétrico. Com os resultados das análises foram calculados a soma de bases (SB), a percentagem de saturação por bases (V%), a saturação por Al (m%) e a capacidade de troca de cátions (CTC).

Os resultados desta determinação estão contidos na Tabela 1 e 2, em que seus valores foram obtidos a partir do banco de dados dos Valores de Referência de Qualidade (VRQ) de Elementos Químicos para os Principais Tipos de Solos dos Estados de Alagoas e Sergipe (MOURA, 2018). O principal critério de escolha das amostras foi o teor de argila, sendo ordenadas na sequência de 1 a 11 e os teores de argila em ordem crescente.

Tabela 1 - classificação, localização e atributos químicos das amostras de solo no estado de Alagoas

Solo	Classificação	Local	pH ⁽¹⁾	Ca	Mg	Al	H+Al	S ⁽²⁾	T ⁽³⁾	V ⁽⁴⁾	MO	Na	K	P
				-----				cmol _c dm ⁻³ -----	----- % -----		g kg ⁻¹	-----	mg dm ⁻³ -----	
1	RR	Pariconha	7,3	9,10	5,30	0,00	2,90	15,87	18,77	85,0	39,9	195,0	244	60,0
2	RQ	Mata Grande	5,0	0,40	0,20	0,60	2,40	0,70	3,60	18,8	6,8	-	29	11,7
3	PA1	Penedo	4,7	0,50	0,30	0,70	2,60	0,99	3,59	27,0	10,7	25,0	30	4,0
4	SX	Piranhas	6,3	5,20	1,70	0,00	3,60	7,50	11,00	67,7	35,8	-	213	68,0
5	PA2	Coruripe	4,9	1,40	0,70	0,80	4,90	2,38	7,28	33,0	28,7	45,0	32	4,0
6	LV	Arapiraca	5,6	3,20	1,70	0,25	4,31	5,36	9,67	55,0	22,0	30,0	128	3,0
7	PA3	São Miguel dos Campos	4,8	1,00	0,50	1,00	4,80	1,71	6,51	26,0	26,3	25,0	40	5,0
8	LVA	São Sebastião	5,7	1,20	0,80	0,00	2,80	2,45	5,25	47,0	16,2	30,0	126	3,0
9	PVA	União dos Palmares	5,3	1,80	0,80	0,30	4,90	2,85	7,75	37,0	29,5	25,0	54	7,0
10	LA1	Rio Largo	5,2	2,10	0,80	0,70	6,90	3,16	10,06	31,0	43,3	35,0	42	4,0
11	LA2	Joaquim Gomes	4,6	0,90	0,50	1,30	8,50	1,68	10,18	16,0	44,5	30,0	58	4,0

⁽¹⁾: pH em água;⁽²⁾: Soma de Base;⁽³⁾: Capacidade de Troca de Cátions;⁽⁴⁾: Saturação por bases;

RR: Neossolo Regolítico; RQ: Neossolo Quartzarênico; PA1: Argissolo Amarelo Distrocoeso; SX: Planossolo Háplico; PA2: Argissolo Amarelo Distrocoeso; LV: Latossolo Vermelho; PA3: Argissolo Amarelo Distrocoeso; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; PVA: Argissolo Vermelho Amarelo; LA1: Latossolo Amarelo Distrocoeso; LA2: Latossolo Amarelo Distrocoeso.

Tabela 2 - atributos físicos das amostras de solo

Solo (Classificação)	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
		g kg⁻¹		
1 (RR)	570	210	50	Franco-Arenosa
2 (RQ)	920	20	60	Areia
3 (PA1)	840	40	120	Areia-Franca
4 (SX)	710	160	130	Franco-Arenosa
5 (PA2)	690	150	160	Franco-Arenosa
6 (LV)	660	100	240	Franco-Argiloarenosa
7 (PA3)	650	90	260	Franco-Argilosarenosa
8 (LVA)	610	90	300	Franco-Argilosa
9 (PVA)	460	200	340	Franco-Argilosa
10 (LA1)	540	80	380	Argilo-Arenosa
11 (LA2)	400	140	460	Argilosa

3.3 Determinação dos Teores de Fe e Al Cristalinos e Amorfos das Amostras de Solo

As determinações seguiram o método de MEHRA & JACKSON (1960) e os valores obtidos estão descritos na Tabela 3.

3.3.1 Determinação de Fe e Al pela Solução Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB)

As formas de ferro livre mais cristalinas de ferro e alumínio (Fe_d e Al_d) foram extraídas com soluções ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), usando três extrações sucessivas de 15 min à temperatura de 80 °C. Amostra de 0,2 g de solo acondicionada em tubo de falcon de 50 mL, em seguida adiciona-se 40 mL de solução de citrato-Na 0,3 M (Na₃C₆H₅O₇.2H₂O) e 5 ml de solução bicarbonato-Na 1M (NaHCO₃). A seguir, o tubo foi colocado em banho-maria a 80° C, onde, adicionou a cada tubo 1 g de ditionito de sódio (Na₂S₂O₄), parcelado em três alíquotas (≅ 0,33 g). Após a adição de cada alíquota de ditionito de sódio, a suspensão foi agitada manualmente com bastão de vidro durante 1 min. Finalmente, centrifugou a suspensão a 5000 rpm durante 5 min e o sobrenadante foi separado e reservado para posterior determinação de Fe e Al presentes. A determinação destes foram realizadas colorimetricamente a 510 e 530 nm, respectivamente.

3.3.2 Determinação de Fe e Al pela Solução de Oxalato de Amônio

Para extração dos óxidos amorfos (mal cristalizados) de Fe e Al (Fe_o e Al_o) foram feitas com a solução de oxalato de amônio. Amostra de 0,5 g de solo foi acondicionada em tubo falcon de 50 mL, em seguida, adicionada 20 mL de oxalato ácido de amônia 0,2 M a pH 3. A suspensão foi agitada durante 4 horas no escuro, em agitador vertical, logo após foi feita uma centrifugação durante 15 min a 5000 rpm. No sobrenadante foram feitas determinações de Fe e Al colorimetricamente a 510 e 530 nm, respectivamente.

3.3.3 Determinação de Fe e Al pela Solução de Pirofosfato de Sódio

Para as determinações de Fe e Al complexados por Matéria Orgânica (Fe_p e Al_p) foram feitas com a solução de pirofosfato de sódio. Amostra de 0,3 g de solo foi adicionada em tubo falcon de 50 mL, em seguida, adicionada 30 mL da solução de pirofosfato de sódio 0,1M. As amostras foram agitadas por 12 horas, em agitador vertical, logo após foi feita uma centrifugação durante 10 minutos a 20000 rpm. No sobrenadante foram feitas determinações de Fe e Al colorimetricamente a 510 e 530 nm, respectivamente.

Tabela 3 - teores de ferro e alumínio cristalinos e amorfos das amostras de solo

Solo (Classificação)	Fe_d	Fe_o	Fe_p	Al_d	Al_o	Al_p
	g kg ⁻¹					
1 (RR)	1,07	1,28	0,50	0,79	0,41	0,21
2 (RQ)	1,08	1,69	0,63	0,78	0,33	1,02
3 (PA1)	4,22	1,94	0,39	1,16	0,47	0,94
4 (SX)	13,11	13,60	0,59	3,82	0,61	1,17
5 (PA2)	11,44	3,12	1,50	6,34	0,73	1,27
6 (LV)	30,30	4,83	0,70	9,25	0,84	0,48
7 (PA3)	14,64	26,78	0,98	0,24	0,94	1,66
8 (LVA)	32,23	2,97	0,54	13,21	0,51	0,59
9 (PVA)	23,34	12,41	0,91	11,22	0,63	1,48
10 (LA1)	23,91	6,64	2,26	19,01	0,78	2,45
11 (LA2)	18,69	6,94	1,33	3,55	0,48	1,91

_d: determinados por ditonito citrato bicarbonato de sódio;

_o: determinados por oxalato de amônio;

_p: determinados por pirofosfato de sódio.

3.4 Determinação do P-remanescente das Amostras de Solo

Para as determinações, foram preparadas as seguintes soluções:

- Solução de $CaCl_2$ 1,0 M: em um béquer de 1000 mL pesou-se 110,98 g de Cloreto de Cálcio; dissolveu-se em água destilada com o auxílio de um bastão de vidro; passou-se para um

balão volumétrico de 1000 mL e completou-se o volume com água destilada; estocou-se em frasco escuro.

- Solução de CaCl_2 0,01 M: Pipetou-se 10 mL da solução de CaCl_2 1,0 M para um balão volumétrico de 1000 mL e completou-se com água destilada.

- Soluções de CaCl_2 com diferentes concentrações, 0 a 60 mg L^{-1} de P: Pipetou-se 50 mL da solução de CaCl_2 0,01M e pipetou-se diferentes volumes, que variaram de 0 a 200 mL, da solução de 300 mg L^{-1} de P para um balão volumétrico de 1000 mL e completou-se com água destilada.

- Solução 725: em um béquer de 1000 mL adicionou-se 1,0 g de Subcarbonato de Bismuto e, em seguida, 138 mL de H_2SO_4 concentrado. Em béquer separado, foi dissolvido 20,0 g de Molibdato de Amônio e adicionou-se ao béquer. Transferiu-se essa solução para um balão volumétrico de 1000 mL e completou-se o volume com água destilada.

- Reagente de Trabalho (RT): foi utilizada a proporção adequada para 50 amostras, em que se utilizou 50 mL de solução 725 e 0,40 g de ácido ascórbico dissolvido em água destilada, transferiu-se para balões volumétricos em que o volume final fosse igual a 450 mL e completou-se o volume com água destilada.

De acordo com ALVAREZ et al. (1990), com amostras duplicatas a determinação do P-Remanescente foi feita com uma solução em equilíbrio obtida após agitação da amostra de solo de $2,5 \text{ cm}^3$ com 25 mL de solução de CaCl_2 0,01M, contendo 60 mg L^{-1} de P, durante 1 h em agitador vertical. Após centrifugar por 5 min a 3000 rpm, retirou-se alíquotas de 1,0 mL, adicionou-se 9,0 mL de Reagente de Trabalho e o P em solução foi dosado colorimetricamente a 725 nm. Os valores obtidos estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Fósforo Remanescente (P-Rem) das amostras de solo estudadas.

Solo (Classificação)	P-Rem mg L^{-1}
1 (RR)	56,1
2 (RQ)	55,6
3 (PA1)	54,5
4 (SX)	43,5
5 (PA2)	49,8
6 (LV)	48,3
7 (PA3)	39,2
8 (LVA)	51,6
9 (PVA)	36,4
10 (LA1)	21,7
11 (LA2)	23,2

3.5 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)

A determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP) foi com doses crescentes de P, de acordo com os valores de P remanescente. Diante disso, os solos foram agrupados e classificados, logo após, foram feitos 11 pontos com doses crescentes de P (Tabela 5).

Tabela 5 - Grupos de solos de acordo com os valores de P-remanescente.

Grupo	P-Remanescente -----mg L ⁻¹ -----	Doses de P	Classe	Solo
I	15 – 22	0 – 135	M ⁽¹⁾	Amostra 10
II	22 – 30	0 – 100	B ⁽²⁾	Amostras 9 e 11
III	≥ 30	0 – 60	MB ⁽³⁾	Amostras 1 a 8

⁽¹⁾: média; ⁽²⁾: baixa; ⁽³⁾: muito baixa.

Foi retirado da amostra 2,5 cm³ e adicionou-se 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01 M, contendo doses crescentes de P, variando entre 0 e 135 mg/L., agitados por 24 h em agitador vertical e em seguida centrifugada por 5 min a 3000 rpm para determinação do P em solução colorimetricamente a 725 nm, conforme BRAGA E DEFELIPO (1974).

O P adsorvido foi calculado pela equação:

$$qe = \frac{(Co - Ce)V}{m}$$

Em que: qe: quantidade de P em solução de equilíbrio (mg g⁻¹); Co: concentração de P observada (mg L⁻¹); Ce: concentração de P esperada (mg L⁻¹); V: volume da solução extratora (mL); m: massa utilizada da amostra de solo (g).

3.6 Construção das Isotermas de Adsorção

Os valores da CMAP foram avaliados e ajustados à isoterma de adsorção, estimada pela equação de Langmuir linearizada, optando pela segunda região da isoterma de Langmuir. Os procedimentos de ajuste foram feitos por meio de equação de regressão e desenvolvido no software MS Excel, levando em consideração a quantidade de fósforo adsorvido (Y) e a concentração na solução de equilíbrio (X).

3.7 Correlações, Regressões e Desempenho Estatístico dos Valores Obtidos

Foram feitas correlações e regressões entre os valores determinados de CMAP e os demais atributos determinados nos solos e testados pelo teste t. De modo complementar, foi determinada a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), além dos seus componentes, denominados erro sistemático (RMSEs), erro não sistemático (RMSEu) e índice de concordância (d), visando avaliar a eficiência do método de isoterma de Langmuir 2ª região linearizada, conforme WILLMOTT (1985). Os critérios para a análise de desempenho estatístico seguiram a sequência: $< \text{RMSE}$; $\text{RMSEs} \cong 0$; $\text{RMSEu} \cong \text{RMSE}$; $> d$. Essas correlações, regressões e cálculos dos índices de desempenho estatístico foram feitos no software MS Excel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vale destacar, de acordo com os resultados observados obtidos através das análises de fertilidade das amostras de solo, os valores de pH variam de 4,6 a 7,3 indicando a presença de alumínio trocável (Al^{3+}); conforme os valores soma de bases (S), ou seja, Ca, Mg, K e Na, indicam o grau de intemperismo do solo, onde os solos considerados mais jovens, ou seja, que sofreram menos intemperismo, os teores dos quatro elementos são mais altos, já os solos que sofreram mais intemperismo como os Latossolos, por exemplo, os teores dos elementos citados são mais baixos; as porcentagens de capacidade de troca catiônica (T%), na maioria dos solos foi influenciada pelos teores de Matéria Orgânica (MO), ocorrendo variação; a saturação por bases (V%) foi influenciada, principalmente, pelos valores da acidez potencial (H+Al) e pela soma de bases (S), apresentando variação e os teores de Fósforo (P) em solos arenosos foram mais altos do que em solos mais argilosos.

É observado nos resultados da análise granulométrica, as diferentes classes texturais das amostras de solo estudadas e, de acordo com o teor de Argila, as amostras de solo foram ordenadas de forma crescente. O conteúdo de argila influencia na capacidade de troca catiônica, em conjunto aos teores de Matéria Orgânica e, também, na capacidade máxima de adsorção de Fósforo (CMAP) pois há maior quantidade de óxidos nesta fração.

Os teores de ferro livre mais cristalino (Fe_d) variaram de 1,07 a 32,23 g kg⁻¹, os teores de ferro amorfo (Fe_o) foram de 1,28 a 26,78 g kg⁻¹ e os teores de ferro complexado por matéria orgânica (Fe_p) foram entre 0,39 a 2,26 g kg⁻¹. Foram verificados teores de alumínio livre mais cristalino (Al_d) entre 0,24 a 19,01 g kg⁻¹, os teores de alumínio amorfo (Al_o) foram 0,33 a 0,94 g kg⁻¹ e os teores de alumínio complexado por matéria orgânica (Al_p) foram de 0,21 a 2,45 g kg⁻¹.

A relação Fe_o/Fe_d indica quais formas do elemento predominam no solo. Em solos bem drenados e altamente intemperizados, como Latossolos em geral, essa relação tende a ser bastante baixa, geralmente menor do que 0,05, evidenciando um predomínio de óxidos de Fe de maior cristalinidade (MELO *et al.*, 2001). Por outro lado, em solos mal drenados e ricos em M.O. essa relação é mais elevada devido a inibição da cristalização dos oxihidróxidos (SCHWERTMAM & TAYLOR, 1989).

Al_p e Fe_p ligados à Matéria Orgânica e, portanto, seus teores variam principalmente em função da quantidade desse material nos solos. De maneira geral, os valores de Al_p são maiores

que os Fe_p , demonstrando maior afinidade dos óxidos de Al com a matéria orgânica, quando comparados aos óxidos de Fe.

Essa maior afinidade dos óxidos de Al com a Matéria Orgânica se deve, principalmente, a maior superfície específica desse material, pois, a matéria orgânica apresenta uma grande concentração de grupos funcionais, dentre os quais se destacam os grupos carboxílicos que apresentam capacidade de estabelecer interações via reações de coordenação com os grupos-OH presentes na superfície destes minerais (CORNEJO; HERMOSIN, 1996).

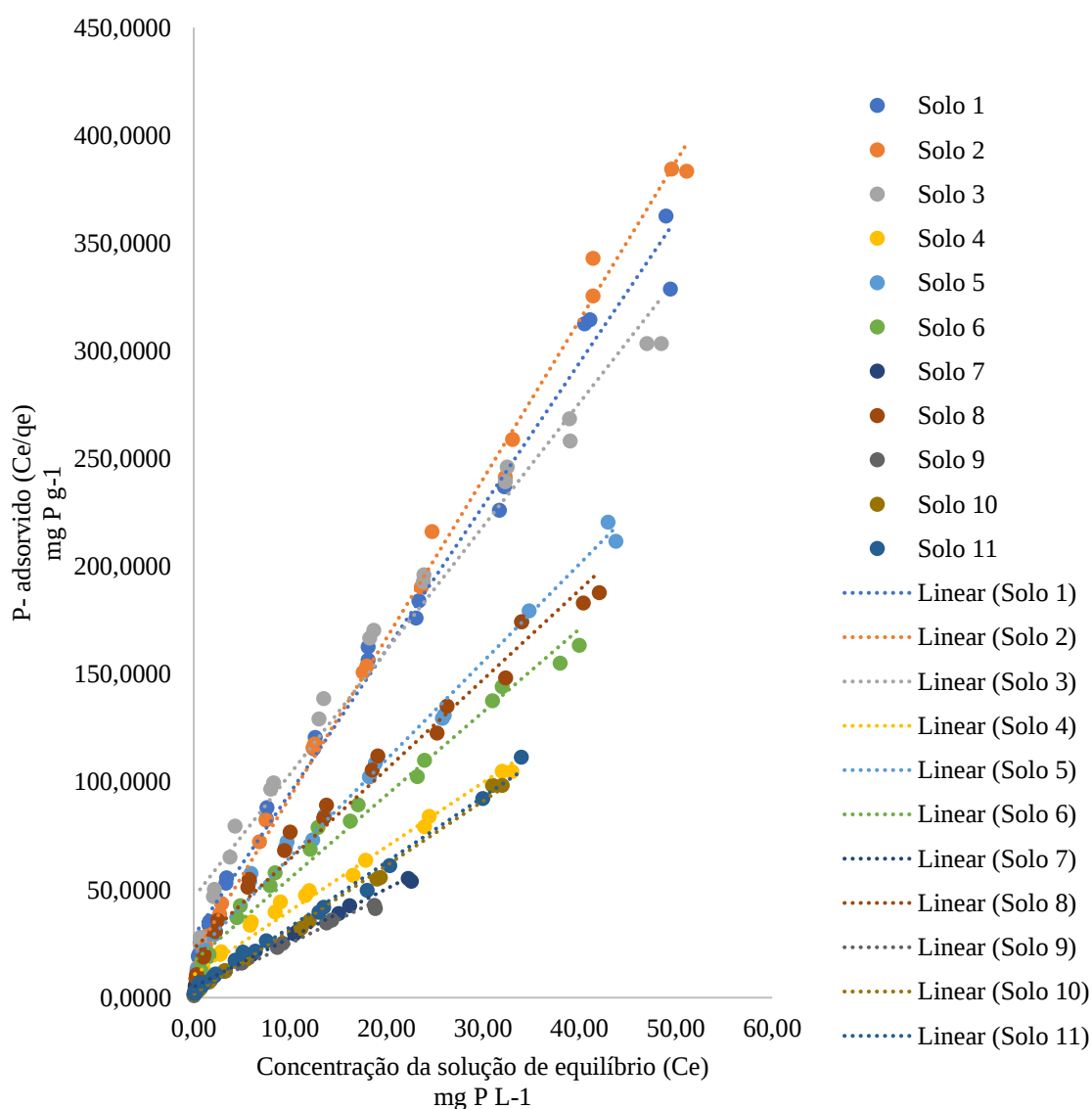
Diversos trabalhos já demonstram que a forma predominante dos óxidos de Fe no solo, influencia diretamente a quantidade de Fe extraído pelo DCB, pois o ditionito é mais eficiente na extração da hematita do que na extração da goethita devido, principalmente, à maior quantidade de substituição isomórfica na goethita (FONTES; WEED, 1996)

Os valores de P-Remanescente, variando de 21,7 a 56,1 mg L⁻¹, apresentaram grande amplitude e indicando ampla variação na capacidade de fixação de P nas amostras de solo estudadas.

A partir dos dados obtidos construiu-se isotermas de adsorção com o modelo proposto por Langmuir. As equações lineares, coeficientes de determinação (R^2) e demais atributos estão na Tabela 6, a partir das equações de regressão linear, foi estimado a CMAF e K_L , cumprindo as pressuposições da isoterma de Langmuir (ALVAREZ, 1982). Plotando-se a quantidade de Fósforo adsorvido (mg P g⁻¹) no eixo Y e a concentração na solução de equilíbrio (mg P L⁻¹) no eixo X (Figura 2).

Tabela 6 - equações da isoterma de Langmuir.

Solo (Classificação)	Equação de Langmuir	R ²	C _{MAP} (mg g ⁻¹)	K _L (mg L ⁻¹)
1 (RR)	$\hat{Y} = 6,483 + 35,516x$	0,989	0,154	0,183
2 (RQ)	$\hat{Y} = 7,500 + 21,627x$	0,994	0,134	0,339
3 (PA1)	$\hat{Y} = 6,300 + 48,181x$	0,992	0,166	0,118
4 (SX)	$\hat{Y} = 3,077 + 10,006x$	0,973	0,352	0,207
5 (PA2)	$\hat{Y} = 4,091 + 27,406x$	0,982	0,245	0,149
6 (LV)	$\hat{Y} = 3,851 + 20,212x$	1,000	0,260	0,191
7 (PA3)	$\hat{Y} = 2,381 + 4,7101x$	0,990	0,420	0,504
8 (LVA)	$\hat{Y} = 4,073 + 28,870x$	0,980	0,246	0,140
9 (PVA)	$\hat{Y} = 1,672 + 6,332x$	0,975	0,597	0,265
10 (LA1)	$\hat{Y} = 1,021 + 1,218x$	0,990	0,998	0,731
11 (LA2)	$\hat{Y} = 1,203 + 3,383x$	0,980	0,831	0,356

**Figura 2** - isoterma linearizada de Langmuir das amostras de solo.

As equações linearizadas de Langmuir (Tabela 6 e Figura 2), apresentou alto coeficiente de correlação, indicando que o modelo de Langmuir de adsorção foi significativamente capaz de estimar as constantes de adsorção de P em todas amostras de solo estudadas, assim como outros trabalhos (GODINHO et al., 1997; CORRÊA et al., 2011; GUEDES et al., 2015; MATOS et al., 2017; VINHA et al., 2021).

Os valores de CMAP variaram de 0,121 a 0,938 mg g⁻¹, em ordem decrescente do valor de CMAP apresentaram-se os solos: 10 > 11 > 9 > 7 > 4 > 6 > 8 > 5 > 3 > 1 > 2. Resultados semelhantes na amplitude de variação dos valores de CMAP foram obtidos por LIMA et al. (2018) avaliando a adsorção e dessorção de Fósforo por Solos Agricultáveis com Citros e por RICHART et al. (2006) estudando a capacidade máxima de adsorção de fósforo para quatro solos do Estado do Paraná. FARIAS et al. (2009) avaliando os parâmetros das isotermas de adsorção de P em solos representativos do estado da Paraíba, também encontraram ampliação semelhante na CMAP. FALCÃO E SILVA (2004), avaliando as características de adsorção de P em alguns solos da Amazônia Central, também constataram ampla variação na CMAP, com valores entre 0,30 a 0,89 mg g⁻¹. CÔRREA et al. (2011) estudando a adsorção de fósforo em dez solos do estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos observou uma variação de 0,037 a 0,904 mg g⁻¹.

A energia de adsorção (K_L) variou de 0,118 a 0,731 mg L⁻¹ nas amostras de solo estudadas, evidenciando que a adsorção de P está mais relacionada com a CMAP do que com a K_L .

Tabela 7 – índice de desempenho estatístico para o modelo de Isoterma de Langmuir, 2ª região linearizada.

Solo	CMAP ⁽¹⁾	K_L ⁽²⁾	R ²	RMSE ⁽³⁾	RMSE _s ⁽⁴⁾	RMSE _u ⁽⁵⁾	d ⁽⁶⁾
1	0,154	0,183	0,991	0,007	0,005 (48,0)	0,005 (52,0)	0,920
2	0,134	0,339	0,999	0,006	0,004 (55,3)	0,004 (47,7)	0,926
3	0,166	0,118	0,996	0,008	0,005 (36,4)	0,007 (63,6)	0,913
4	0,352	0,207	0,983	0,017	0,009 (31,3)	0,014 (68,7)	0,921
5	0,245	0,149	0,985	0,011	0,008 (54,5)	0,007 (45,5)	0,915
6	0,260	0,191	0,978	0,013	0,007 (28,5)	0,011 (71,5)	0,912
7	0,420	0,504	0,990	0,018	0,003 (3,6)	0,018 (96,4)	0,940
8	0,246	0,140	0,986	0,012	0,007 (41,7)	0,009 (58,3)	0,919
9	0,597	0,265	0,976	0,049	0,019 (14,0)	0,046 (86,0)	0,868
10	0,998	0,731	0,990	0,120	0,078 (41,6)	0,092 (58,4)	0,863
11	0,831	0,356	0,983	0,050	0,021 (18,6)	0,045 (81,4)	0,904

(1): mg g⁻¹; (4): erro sistemático;
 (2): mg L⁻¹; (5): erro não sistemático;
 (3): raiz quadrada do erro médio quadrático; (6): índice de concordância.

A Tabela 7 apresenta os resultados da avaliação de eficiência do método da isoterma de Langmuir, 2ª região linearizada, observa-se a exatidão do uso deste modelo para a estimativa da CMAP e K_L , conforme observado por CAVALCANTE (2022) estudando isotermas de adsorção de Langmuir para fósforo em solos de Alagoas.

Os resultados das correlações dos atributos das amostras de solo estudadas e a capacidade máxima de adsorção de Fósforo estão na Tabela 8.

Tabela 8 - resultados da análise estatística, obtidos por correlação, regressão e teste t, em que CMAP é a variável correlacionada com os demais atributos das amostras de solo.

Atributos	r	R ²	Teste t
pH	-0,114	0,013	0,739 ns
P	-0,078	0,006	0,819 ns
K	-0,228	0,052	0,500 ns
Ca	0,097	0,009	0,777 ns
Mg	0,109	0,012	0,750 ns
Al	0,494	0,244	0,122 ns
H+Al	0,679	0,461	0,022 *
SB	0,069	0,005	0,841 ns
CTC	0,699	0,489	0,017 *
V	-0,367	0,135	0,267 ns
m	0,339	0,115	0,308 ns
MO	0,808	0,653	0,003 **
Argila	0,849	0,721	0,006 **
P-Rem	-0,988	0,976	0,000 **
Fe _d	0,437	0,191	0,179 ns
Al _d	0,540	0,292	0,086 ns
Fe _o	0,304	0,092	0,364 ns
Al _o	0,316	0,100	0,344 ns
Fe _p	0,792	0,627	0,004 **
Al _p	0,871	0,759	0,005 **

Os coeficientes de correlação dos atributos dos solos com a CMAP foram, em sua maioria, positivos e em alguns significativos a 1% ou a 5% de probabilidade de acordo com o teste t.

De maneira geral, neste trabalho, foi observado relações com P-Rem (r -0,988 significativa); Matéria Orgânica (r 0,808 significativa); CTC (r 0,699 significativa); H+Al (r 0,679 significativa); Argila (r 0,849 significativa); teores de Fe (r 0,792 significativa) e Al (r 0,871 significativa) complexados por Matéria Orgânica, indicando que contribuem no processo de adsorção de fósforo.

A relação da CMAP com o P-Rem há correlação negativa, assim como FARIAS et al. (2009), e considerada significativa pelo teste t.

A relação da CMAP com a Matéria Orgânica considerada positiva já foi concluída por diversos autores (GUILHERME et al., 1993; RHEINHEIMER et al., 2003; VALLADARES et al., 2003; MORERIA et al., 2006; CHAVES et al., 2007). MOREIRA (2006) estudando a Adsorção de fósforo em solos do Estado Ceará cita WILD (1950), que afirma a existência dessa correlação está ligada aos íons orgânicos carregados negativamente que compartilham as valências dos cátions fazendo pontes com os íons fosfatos.

A relação da CMAP com a CTC apresentou expressiva relação por estar, também, ligada com a concentração de argila e matéria orgânica, atributos que estão relacionados com a CMAP.

A relação da CMAP com a Acidez potencial (H+Al) foi observada de forma direta, também foi observada por outros autores (GUILHERME et al., 2000 e CORRÊA et al., 2011).

A relação da CMAP com a Argila indica a dependência do processo de adsorção de P e da dinâmica deste elemento com a presença de coloides no solo. Este comportamento foi observado em diversos trabalhos (CORRÊA et al. 2011; BOSCHETTI et al. 1998; FALCÃO & SILVA, 2004; VALLADARES et al., 2003). Portanto os teores de argila podem estimar a CMAP, estabelecendo expressiva relação entre esses dois parâmetros.

A relação da CMAP com os teores de Fe complexados por Matéria Orgânica (Fe_p) foi considerada boa, possivelmente pela atuação da Matéria Orgânica.

A relação da CMAP com os teores de Al complexados por Matéria Orgânica (Al_p) apresentou intervenção, possivelmente por conta da Matéria Orgânica.

As análises de regressão realizadas entre a CMAP e os atributos do solo resultaram em equações, em que a CMAP pode ser estimada utilizando dados de P-Rem; Matéria Orgânica; CTC; Acidez potencial (H+Al); Argila; Fe e Al complexados pela matéria orgânica e Al livre mais cristalino.

A relação da CMAP com o P-Rem possui regressão de excelente ajuste, assim como BOSCHETTI et al. (1998) e CORRÊA et al. (2011).

5. CONCLUSÕES

Os atributos químicos e físicos das amostras de solo estudadas apresentaram variação entre suas características.

Os valores de P-Remanescente apresentaram variação de 21,7 a 56,1 mg L⁻¹, indicando que os solos estudados apresentam capacidade de fixação de fósforo muito diferentes. Os solos apresentaram Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) com ampla variação, de 0,121 a 0,938 mg g⁻¹. A isoterma de Langmuir se ajusta bem à adsorção de fósforo e mostra grande eficiência no cálculo dos parâmetros do P no solo.

Conforme os teores das diferentes formas de Fe e Al das amostras de solo estudadas, os óxidos de Al apresentaram maior afinidade a matéria orgânica do solo do que os óxidos de Fe. Com exceção as formas de Fe e Al extraídos pelo pirofosfato, todos os demais teores foram influenciados pela textura do solo.

Dentre os atributos químicos e físicos estudados, P-Rem; Matéria Orgânica; CTC; Acidez potencial (H+Al); Argila; teores de Fe e Al complexados pela matéria orgânica e Al livre mais cristalino, permitem para as amostras de solo estudadas a estimativa do valor da CMAP

Dos atributos químicos e físicos estudados P-Rem; Matéria Orgânica; CTC; Acidez potencial (H+Al); Argila; teores de Fe e Al complexados pela matéria, apresentaram correlação significativa com a CMAP e influenciam no comportamento do fósforo no solo.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V.H. **Effecto de los factores cantidad, insentidad y capacidade amortiguadora de fosfato em la evaluacion del fósforo disponible de suelos derivados de cenizas vulcânicas de la Meseta Tarasca**, Edo. Michoacáu. Chapingo, México; Colégio de Postgraduados, 1982. 300p. Dissertação de Doutorado.
- ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p, 49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.27-32, 2000.
- ATKINS, P. W. **Physical chemistry**. 5.ed Oxford: Oxford University Press, 1072p, 1994.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do planalto central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, n.1, p.221-226, 1983.
- BARBER S.A Soil nutriente bioavailability: a mechanistic approach. 2nd ed. New York: **John Wiley & Sons**; 1995.
- BARROW, N.J. The description of phophorus adsorption curves. **Soil Sci.**, v. 29, 447-462p, 1978.
- BEZERRA, A.L.L.; LIMA, I.M.A.; NASCIMENTO, B.L.M.; AQUINO, B. F. Influência da calagem na adsorção de fósforo em diferentes solos do estado do Ceará. **Revista ACSA - OJS**, Campina Grande, v.9, n. 4, p. 01 – 05, 2013.
- BOHN, H., MCNEAL, B., O' CONNOR, G. Soil Chemistry. **J. Wiley**, Toronto. 341p, 1985.
- BOSCHETTI, A.N. G.; QUINTERO, G. C. E.; BENAVIDEZ, Q.R.A. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Rios, Argentina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 95-99, 1998.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v.21, p.73-85, 1974.
- CARNEIRO, L.F.; RESENDE, A.V.; NETO, A.E.F.; SANTOS, J.Z.L.; CURI, N.; REIS, T.H.P.; VALLE, L.A.R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.483-491, 2011.
- CASAGRANDE, J.C.; SOARES, M.R. Recuperação de solos degradados: interação solo-planta. In: **CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 58, 2007. São Paulo, SP Resumos... São Paulo, p. 53-57, 2007.
- CAVALCANTE, P.H.M., **Isotermas de Adsorção de Langmuir para Fósforo em Solos de Alagoas**. Rio Largo/AL: Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, 2022.
- CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I. B; MENDES, J.S. Adsorção de fósforo em materiais de latossolo e argissolo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.20, n.3, p.104-111, 2007.

CORNEJO, J.; HERMOSÍN, M.C. Interactions of humic substances in soils clays. In: PICCOLO, A. Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: Elsevier, p. 595-624, 1996.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; ROCHA, A.T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.33, ed-1, p.153-159, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos;1).

EXCEL (2019). [Software]. Microsoft, Redmond, Washington, EUA.

FALCÃO, N.P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.

FARDEU, J.C. Dynamics of phosphate in soils Na isotopic outlook. **Fert. Res.**, 91-100, 1996.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I – Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorptions by clays from Brazilian oxisols: relationships with specific surface área and mineralogy. *Geoderma*, Amsterdam, v. 72, n. 1-2, p. 37-51, 1996.

GORDINHO, V. P. C.; SAMPAIO, R. A.; VENEGAS, V. H. A.; RUIZ, H. A. Adsorção de fosfatos em três solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 819 – 823, 1997.

GUEDES, R. S.; FERNANDES, A.R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J.R.R. Maximum Phosphorus Adsorption Capacity Adjusted to Isoterm Models in Representative Soil of Eastern Amazon. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, p. 2615-2627, 2015.

GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; BRENÓ, N.B. & MACHADO, R.A.F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.27-34, 2000.

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uru-guai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.223-230, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Estados – Alagoas, 2020. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=al>>. Acesso em: 06 de janeiro de 2022.

JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. **Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos do estado de Alagoas**. Recife, Embrapa/Centro de Pesquisas Pedológicas, SUDENE-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35).

LIMA, L.C. **Avaliação da adsorção e dessorção de fósforo por solos agricultáveis com citros**. 2018. Graduação (Química Licenciatura) – Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2018.

MACHADO, V.J.; SOUZA, C.H.E.; ANDRADE, B.B.; LANA, R.M.Q.; KORNDORFER, G.H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v.27, n.1, p.70-76, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. 1ª ed. São Paulo: Agronômica Ceres, p. 166, 2006.

MATOS, C.H.D.L.; MELO, V.F.; UCHÔA, S.C.P.; NASCIMENTO, P.P.R.R.N.; PEREIRA, R.A. Phosphorus adsorption in soils under forest and savanna from Northern Amazon, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v.38, n.5, p. 2909-2919, set/out 2017.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner.**, v.5, p. 317-327, 1960.

MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B.; SHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de Fe e Al de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p 19-32, 2001.

MOREIRA, F.L.M.; MOTA, F.O.B.; CLEMENTE, C.A.; AZEVEDO, B.M.; BOMFIM, G.V. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.1, p.7-12, 2006.

MOURA, A.D. **Valores de referência de qualidade (VRQs) de metais pesados para os principais tipos de solos de Alagoas**. Universidade Federal de Alagoas, 2018.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R.L.F. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p 965-971, 2004.

NOVAIS, R. F. et al., Fósforo. In: **Fertilidade do solo**. Viçosa: Viçosa, p. 472-537, 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. p.399, 1999.

OLIVEIRA, C.M.B.; GATIBONI, L.C.; MIQUELLUTI, D.J.; SMYTH, T.J.; ALMEIDA, J.A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em latossolo bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1805-1815, 2014.

OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 21, p.144-149, 1957.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação** Piracicaba: Ceres, p. 343, 1991.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 41-49, 2003.

RICHART, A.; BRITO, O.R.; JÚNIOR, N.J.M.; FEY, R.; DEMÉTRITO, G.B.; REIS, L.C.; FUJIMURA, A.M.; CAMOLEZZI, G.B.; TROMBINI, L.P.; SERCUNDES, R.K.; BORIAN, T.B. Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo para quatro solos do estado do Paraná In: **FertBIO**, 5ª edição, 2006. Anais. Bonito/MS.

SCHWERTHANN, V.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds). *Minerals in soil – environments*. 2 ed. Madison, **Soil Sci. Soc. Am.** p. 379-438, 1989.

SHUMAN, L. M. Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions. **Soil Science**, New Brunswick, v. 146, p. 192-198, 1988.

SILVA, L.S.; JÚNIOR, J.M.; SOUZA BAHIA, A.S.R.; CAMARGO, L.A.; PEREIRA, G.T. Capacidade máxima de adsorção de fósforo em solos do nordeste do estado de São Paulo. In: **XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do solo**, São Paulo. 2015. Anais, São Paulo, 2015.

STAUFFER, M.D.; SULEWSK, G. Capítulo 1 – Fósforo Essencial para a Vida. Em: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; (Eds.) Fósforo na Agricultura Brasileira. KP Potafos, p. 1-11, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª edição. Editora Artmed, p. 719, 2004.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 26, n.1, p. 111-118, 2003.

VILAR, C.C.; COSTA, A.C.S.; HOEPERS, A.; SOUZA JUNIOR, I.G. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1059-1068, 2010.

VINHA, A.P.C. et al., Adsorção de Fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, v.9, n.1, p.30-35, 2021.

WILLMONT, C.J. et al., Statistic for evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, Washington, v.0, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WOODRUFF, J. R.; KAMPRATH, E. J. Phosphorus adsorption as maximum measured by the langmuir isotherm and its relation hip to phosphorus availability, **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 29, 148-150p, 1965.