

Áreas sob diferentes níveis de degradação possuem solo com elevados teores de nutrientes trocáveis

Areas under different levels of degradation have soil with high levels of exchangeable nutrients

Wesley dos Santos Souza¹, Jenilton Gomes da Cunha², Manoel Ribeiro Holanda Neto³, Tamires Soares da Silva⁴, Ericka Paloma Viana Maia⁵, Maria Cândida Moitinho Nunes⁶,

RESUMO: No Brasil existe uma grande quantidade de áreas em estágio de degradação e/ou degradadas, no qual se faz necessário o conhecimento das propriedades do solo dessas áreas para com isso ajudar na tomada de decisão da melhor estratégia a ser adotada para sua recuperação. Com isso, o presente estudo teve por objetivo analisar atributos químicos e biológicos de um solo em áreas sob diferentes níveis de degradação em núcleo de desertificação, na região de Gilbués, estado do Piauí, Brasil. A área de estudo localiza-se em um dos núcleos de desertificação do Nordeste, localizado em Gilbués-PI, no Núcleo de Pesquisa de Recuperação de Áreas Degradadas. Foram selecionadas quatro áreas de estudo, sendo elas: Mata Nativa - Área com vegetação tipo cerrado; Área em Recuperação - Processo de recuperação desde 2003, com construção de pequenas barragens e implantação de leguminosas no mesmo ano; Área em Início de Degradação - Vegetação esparsa, com presença de horizonte C exposto e uma Área Degradada - Ausência de cobertura vegetal e perda da camada superficial do solo. A amostragem do solo foi realizada de forma aleatória com coletas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Onde foram avaliados atributos químicos e microbiológicos do solo. O pH e a matéria orgânica do solo foram as variáveis que mais influenciaram nos atributos químicos e biológicos do solo, de forma que ambos se correlacionaram com a maioria dos atributos estudados, evidenciando que são os principais atributos do solo a serem considerados quando se visa a melhoria da qualidade do solo em áreas degradadas.

Palavras-chave: Área degradada, desertificação, qualidade do solo

ABSTRACT: In Brazil, there are many areas in the degradation and/or degraded stage, in which it is necessary to know the soil properties of these areas in order to help in the decision making of the best strategy to be adopted for their recovery. Thus, the present study aimed to analyze chemical and biological attributes of a soil in areas under different levels of degradation in a desertification core, in the region of Gilbués, state of Piauí, Brazil. The study area is in one of the centers of desertification in the Northeast, located in Gilbués - PI, in the Research Center for the Recovery of Degraded Areas. Four study areas were selected, namely: Native Forest - Area with Cerrado type vegetation; Area under Recovery - Recovery process since 2003, with the construction of small dams and planting of legumes in the same year; Area in Beginning of Degradation - Sparse vegetation, with the presence of an exposed C horizon and a Degraded Area - Absence of vegetation cover and loss of the surface layer of the soil. Soil sampling was performed at random with collections in the layers of 0-0.10 and 0.10-0.20 m. Where chemical and microbiological attributes of the soil were evaluated. The pH and soil organic matter were the variables that most influenced the chemical and biological attributes of the soil, so that both correlated with most of the studied attributes, showing that they are the main soil attributes to be considered when aiming at improvement of soil quality in degraded areas.

Keywords: Degraded area, desertification, soil quality.

Autor correspondente: Wesley dos Santos Souza
E-mail: agrowesley95@gmail.com

Recebido em: 16/01/2023
Aceito em: 15/02/2024

¹ Doutor em Agronomia – Ciência do Solo pela UFRRJ. Pós-doutorando na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa Agrobiologia, Seropédica (RJ), Brasil.

² Doutorando do Programa de pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Piauí – UFPI, Bom Jesus (PI), Brasil.

³ Doutorando do PPG em Manejo e Conservação do Solo e da Água – MACSA da Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas (RS), Brasil. Docente DE do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Piauí – UESPI, Corrente (PI), Brasil.

⁴ Mestre em Agronomia- Produção Vegetal pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Petrolina (PE), Brasil.

⁵ Mestre em Ciência do Solo do Programa de pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza (CE), Brasil.

⁶ Doutora em Ciência do Solo/Professora Associada da Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (UFPEL/FAEM), Pelotas-RS, Brasil.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem intensificado a produção de alimentos em larga escala, tornando necessária a utilização constante dos recursos naturais disponíveis, sobretudo o solo, colocando uma carga cada vez maior sobre estes recursos limitados (Swanepoel et al., 2016). Em virtude desse cenário, há um comprometimento dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, caracterizando o início dos estágios de degradação com consequente perda de qualidade dos solos, resultando também em diminuição significativa da vegetação existente.

A região de Gilbués, localizada no nordeste brasileiro, integra um dos quatro maiores centros de desertificação em ambiente tropical do Brasil, o núcleo de Gilbués – PI, seguido pelos núcleos sedes de Irauçuba-CE, Seridó-PB e Cabrobó-PE. O núcleo de Desertificação de Gilbués, no estado do Piauí, é considerado uma das áreas mais degradadas no Nordeste do Brasil (Valladares et al., 2020), sendo o núcleo com altas médias pluviométricas (800 a 1200 mm por ano) (Macambira e Monteiro, 2019). A degradação dessa área é resultante da junção de várias atividades praticadas ao longo dos anos e, dentre elas, destacam-se: o garimpo de diamantes, desmatamento, manejo incorreto na agricultura, pecuária extensiva, uso descontrolado do fogo e estradas mal planejadas, aliadas a fragilidade natural do solo (Lopes et al., 2011).

Tais atividades implicam direta e indiretamente no processo de degradação física, como por exemplo a erosão hídrica, causada principalmente pelo desmatamento e consequente retirada da cobertura vegetal do solo. Além disso, deve ser considerada a ocorrência de processos de origem química, como acidez elevada, salinização, deficiências das bases, lixiviação de NO_3^- , contaminação por resíduos industriais ou subprodutos, e biológicos, como esgotamento do estoque de carbono orgânico e redução da comunidade microbiana (Lal, 2015; Vasu et al., 2020).

Com base nisso, a região de Gilbués apresenta diferentes níveis de degradação do solo, muito em função da perda da cobertura vegetal, com subsequente perda da camada produtiva do solo, devido à ação de processos erosivos, levando à exposição dos horizontes subsuperficiais (B e C) do solo em algumas áreas. Como resultado, têm-se a formação de erosão em sulcos e voçorocas, estágio final e severo do processo de degradação do solo. Entretanto, medidas têm sido tomadas para a recuperação dessas áreas, como a construção de pequenas barragens e uso de plantas de coberturas (Carneiro et al., 2012). Ações como essas podem ser eficazes, já que as plantas podem proteger o solo contra ação das chuvas, como do impacto das gotas e escoamento superficial associado, os quais provocam erosão. A presença de biomassa, devido à cobertura vegetal, facilita o processo de infiltração da água, reduz as taxas de escoamento superficial, contribui para a adição de matéria orgânica e auxilia na agregação do solo (Machado et al., 2014).

A realização de estudos em áreas degradadas é de fundamental importância, visto que o conhecimento gerado auxilia no monitoramento da qualidade do solo e possibilita a tomada de decisões, permitindo que medidas adequadas sejam tomadas para evitar ou minimizar os processos de degradação. Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo analisar atributos químicos e biológicos de um solo em áreas sob diferentes níveis de degradação em núcleo de desertificação, na região de Gilbués, estado do Piauí, Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se em um dos núcleos de desertificação do Nordeste, localizado em Gilbués-PI, no Núcleo de Pesquisa de Recuperação de Áreas Degradadas (NUPERADE), com coordenadas geográficas de 9°52'29.9"S e 45°20'45.6"W (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (estação seca no inverno), megatérmico, possuindo temperaturas médias anuais que variam entre 22 e 31 °C, precipitação média anual de 1.015 mm, com o período chuvoso situando-se entre novembro e março, sendo o período mais seco entre maio e setembro (Macambira e Monteiro, 2019).

O solo predominante nas áreas degradadas é o Neossolo Litólico Eutrófico com afloramento de rochas, apresentando 370,9; 100,3 e 510 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente (Carneiro et al., 2012). O relevo das áreas de estudo caracteriza-se por ser ondulado e suavemente ondulado nas condições naturais, em áreas de mata nativa, e com relevos irregulares, formados por solos declivosos e acidentados, devido à erosão em áreas acometidas por processos de degradação (Carneiro et al., 2012).

2.2 SELEÇÃO DAS ÁREAS E COLETAS DE SOLO

Foram selecionadas quatro áreas de estudo, com base na proposta de Carneiro et al. (2012), sendo elas: Mata Nativa (MN) - Área com vegetação tipo cerrado; Área em Recuperação (REC) - Processo de recuperação desde 2003, com construção de pequenas barragens e implantação de leguminosas no mesmo ano, *Cajanus cajan* (L) (Feijão-guandú), *Crotalaria juncea* (Crotalária), e *Leucaena leucocephala* (Leucena); Área em Início de Degradação (IDEG) - Vegetação esparsa, com presença de horizonte C exposto e uma Área Degradada (DEG) - Ausência de cobertura vegetal e perda da camada superficial do solo. A localização e representação das áreas encontram-se nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Além disso, dados de precipitação pluviométrica acumulada ocorrida na região durante um período de sete anos, podem ser verificados na Figura 3.

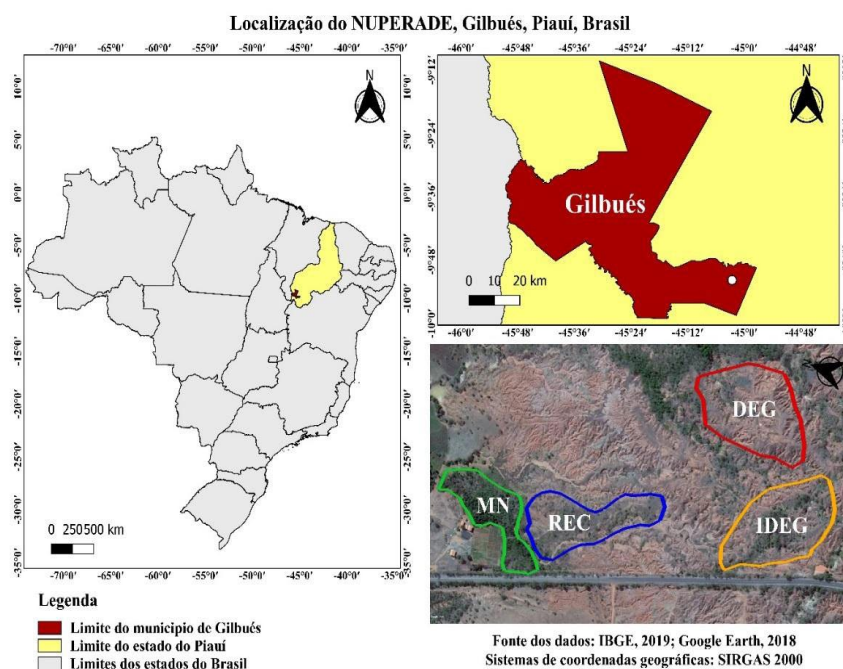


Figura 1. Mapa de localização e identificação das áreas estudadas. MN - Mata Nativa; REC - Área em Recuperação; IDEG - Área em Início de Degradação; DEG - Área Degradada

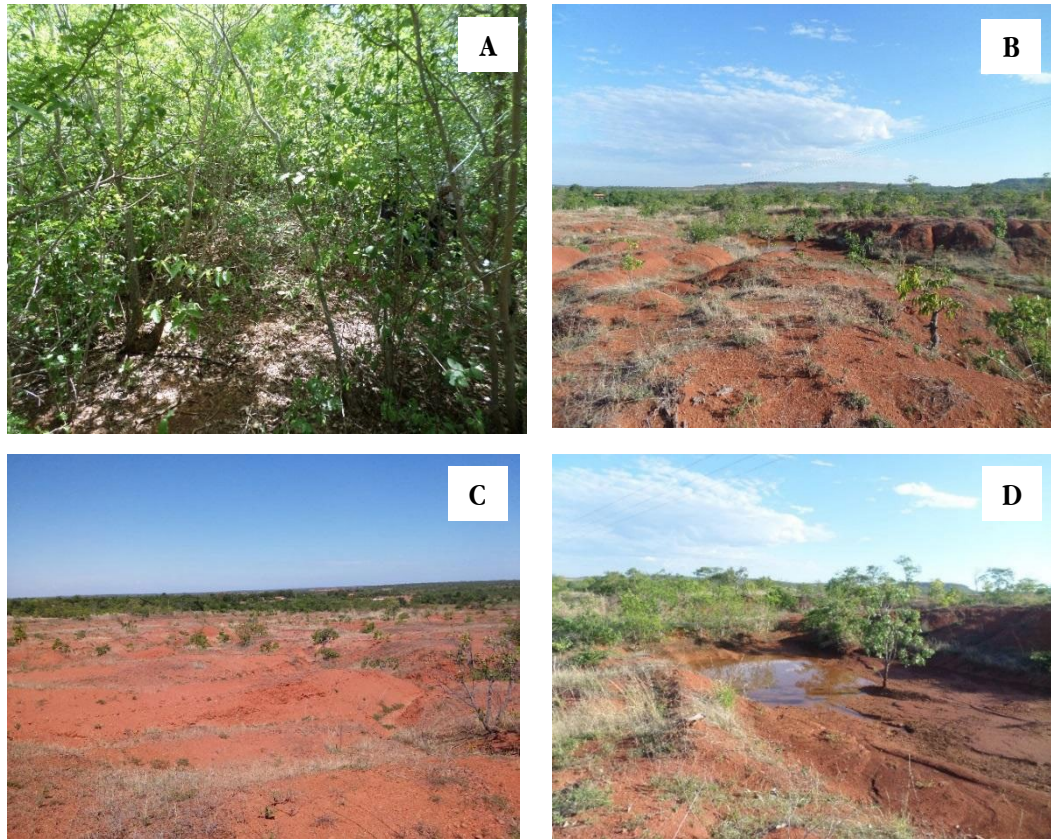


Figura 2. Imagens representativas das áreas selecionadas para estudo. Mata Nativa-MN (A); Área em início de degradação-IDEG (B); Área Degradada-DEG (C); Área em processo de recuperação-REC (D).

Fonte: Autores.

A amostragem do solo foi realizada em fevereiro de 2016, de forma aleatória, em dez pontos amostrais com coletas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em cada área de estudo. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos da Universidade Estadual do Piauí-LASO/UESPI. Parte das amostras foram destinadas a análises microbiológicas, essas foram mantidas a ± 4 °C em refrigerador até o início das análises. Para análises químicas, foi obtida a TFSA (terra fina seca ao ar) de cada amostra e armazenadas em potes de plástico devidamente lacrados e identificados.

2.3 DETERMINAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS

O pH foi determinado em água (H_2O). O cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}) e a acidez trocável (Al^{3+}) foram quantificados por titulometria. O fósforo e o potássio (P e K^+) determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente (Teixeira et al., 2017). Também foi realizado o cálculo de Soma de Bases (SB) a Capacidade de Troca de Cátions (CTC).

A matéria orgânica do solo (MOS) foi determinada através da quantificação do carbono orgânico por oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico (Yeomans e Bremner, 1988). Considerando que a MOS do solo contém 580 g kg^{-1} de carbono, realizou-se a multiplicação do resultado por 1,724 para a obtenção dos teores de MOS.

2.4 DETERMINAÇÃO DE ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS

A respiração basal foi determinada por meio da incubação de amostras em pote hermeticamente fechado, com quantificação do CO_2 capturado por NaOH durante sete dias, conforme descrito por Alef

(1995). O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi mensurado pelo método da irradiação-extração, utilizando forno de micro-ondas (Islam; Weil, 1998; Silva et al., 2007) e quantificado por meio da oxidação úmida (Yeomans; Bremner, 1988). O quociente metabólico (qCO_2), que é a relação entre a Respiração Basal do Solo e o Carbono da Biomassa Microbiana (RBS/CBM), foi obtido por meio de cálculo proposto por Muniz et al. (2018).

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após serem submetidos aos testes de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, os dados foram submetidos à análise de (ANOVA) pelo teste 'F' e, a partir da significância, a comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey, a 5% probabilidade. Uma análise de correlação de Pearson foi realizada entre variáveis e os dados apresentados usando correlograma. Além disso, foi aplicada uma Análise de Componentes Principais, através do pacote FactoMineR (Husson et al., 2017). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no software R (versão 3.4.0, R Core Team, 2020) e os gráficos gerados utilizando o software SigmaPlot 10.0 (Systat Software, San Jose, CA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS

Todas as áreas avaliadas, em ambas as camadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m) apresentaram valores de pH considerados alcalinos, refletindo em atributos que têm relação direta com a acidez do solo, como o $H+Al^{3+}$ e Al^{3+} , que nas diferentes áreas e camadas do solo estudadas responderam estatisticamente de forma semelhante, apresentando teores baixos e inexistentes, respectivamente. Isso ocorre porque, em solos com pH acima de 5,5, a presença do alumínio na forma trocável, tóxica para as plantas (Al^{3+}) é nula (Tiecher et al., 2016), tal fato pode ser confirmado com os resultados encontrados neste estudo (Tabela 1). Em estudos realizados em áreas com estágio avançado de desertificação, localizadas em Irauçuba-CE e no Núcleo de Recuperação de Áreas Degradadas – NUPERAD, em Gilbués-PI, foram encontrados valores de pH semelhantes aos encontrados neste estudo, especialmente nas áreas degradadas e mata nativa (Nunes et al., 2012; Lima, 2019).

Tabela 1. Valores médios da composição química em duas camadas de um solo sob diferentes níveis de degradação, em Gilbués-PI.

(Continua)

Variável	Áreas					Valor 'F'
	Camada (m)	MN	IDEG	DEG	REC	
pH	0,00-0,10	6,67 bB	6,36 bB	8,06 aA	8,02 aA	38,53**
	0,10-0,20	8,09 aA	8,18 aA	8,21 aA	8,24 aA	
Al^{3+} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,00-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33 ^{ns}
	0,10-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	
$H+Al^{3+}$ ($cmol_c dm^{-3}$)	0,00-0,10	0,95	0,97	0,44	0,49	0,53 ^{ns}
	0,10-0,20	0,43	0,62	0,26	0,28	

Variável	Áreas					Valor 'F'
	Camada (m)	MN	IDEG	DEG	REC	
K ⁺ (mg dm ⁻³)	0,00-0,10	202,48 aA	151,46 bA	81,22 cA	103,62 cA	6,38**
	0,10-0,20	142,65 aB	113,74 aB	110,71 aA	131,66 aA	
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00-0,10	17,73 bB	19,16 bB	28,78 aA	28,74 aA	3,19*
	0,10-0,20	25,98 bA	24,11 bA	31,04 aA	31,47 aA	
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00-0,10	9,21 aA	9,31 aB	7,40 aA	8,29 aA	3,70*
	0,10-0,20	10,53 aA	13,58 aA	4,92 bA	5,24 bA	
CTC (cmol _c dm ⁻³)	0,00-0,10	28,41 bB	29,83 bB	36,83 aA	37,79 aA	12,48**
	0,10-0,20	37,30 aA	38,60 aA	36,50 aA	37,32 aA	
V%	0,00-0,10	96,55 bB	96,61 bB	98,73 aA	98,66 aA	1,52
	0,10-0,20	98,81 aA	98,38 aA	99,28 aA	99,26 aA	
MOS g kg ⁻¹	0,00-0,10	31,00 aA	18,80 aA	9,70 bA	28,10 aA	6,22**
	0,10-0,20	19,80 aA	13,40 aA	8,00 bA	15,20 aA	
P (mg dm ⁻³)	0,00-0,10	61,22 bcB	47,06 cB	101,77 aA	95,36 abA	9,74**
	0,10-0,20	105,94 aA	106,41 aA	88,92 abA	53,45 bB	

MN: Mata Nativa; IDEG: Área em Início de Degradação; DEG: Área Degradada; REC: Área em Recuperação. pH: Potencial hidrogeniônico; Al³⁺: Alumínio; H+Al³⁺: Acidez potencial; K⁺: Potássio; P: Fósforo; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; CTC: Capacidade de troca de cátions; MOS: Matéria Orgânica do Solo. ns: não significativo; * e **: significativo ao nível de 5% (p≤0.05) e 1% (p≤0.01) de probabilidade, respectivamente pelo teste 'F'. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas, entre as camadas, e minúsculas, entre as áreas, não diferem estatisticamente entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Foram encontrados altos valores de K⁺ em todas as áreas estudadas. A área DEG apresentou os menores e a área referência de MN, os maiores teores de K⁺ na camada superior (0,0-0,10 m) do solo. Não foi observada diferença significativa entre as áreas estudadas na camada subsuperficial (0,10-0,20 cm) do solo. Por constituir uma área com solo exposto, com ausência de cobertura vegetal na superfície do solo e compondo uma área de relevo acidentado (Figura 1), o K⁺ presente na camada superficial na área degradada (DEG) pode ter sido carregado por meio de processos de escoamento superficial e erosivo, acarretando assim na redução de sua concentração no solo desta área em relação aos demais tratamentos estudados.

Níveis de K⁺ considerados altos também foram reportados por Costa et al. (2019), os quais encontraram valores de 117,38 mg dm³ na camada superficial do solo, em área de mata nativa, na região semiárida do Brasil. Barreto et al. (2008) ressaltam que altos níveis desse elemento podem ser favorecidos pelo fornecimento contínuo de resíduos vegetais, que promove o aumento da CTC e favorece o acúmulo de nutrientes superficialmente, isso explica a maior concentração de K⁺ na MN.

Os teores de Ca²⁺ nas áreas DEG e em REC apresentaram as maiores médias, diferindo estatisticamente da MN e IDEG, porém, não diferiram estatisticamente entre as camadas. Os teores de Ca²⁺ presentes nas áreas de MN e em IDEG foram menores que as outras áreas estudadas, isso ocorreu provavelmente pela maior densidade de vegetação existente nessas áreas, que promove a maior extração do nutriente do solo por meio da vegetação. Ao realizar a caracterização de uma área com leguminosas (*Crotalaria juncea* - *Crotalaria juncea* L. e Feijão guandu - *Cajanus cajan* Mill) na presença e ausência de adubação orgânica em Gilbués-PI, Salviano et al. (2004) encontraram teores de Ca²⁺ (29,1 cmol_c dm⁻³) semelhantes aos encontrados na área IDEG, que também apresentava leguminosas. Os mais altos teores nas áreas mais degradadas podem

ter ocorrido em decorrência da exposição de horizontes mais próximos ao material de origem, menos intemperizados devido aos processos erosivos, o que faz com que essas camadas estudadas possam estar presentes nesses horizontes.

Outro fato observado na MN e IDEG foi a maior concentração de Ca^{2+} na camada mais subsuperficial, tal acontecimento pode ser atribuído a maior faixa de pH nessa camada, já que quando se tem a elevação de pH teve a redução de H^+ e Al^3+ o que conseqüentemente proporciona a elevação da concentração de Ca^{2+} nos colóides do solo, pois são atributos quem tem forte correlação (Figura 4).

Para o elemento Mg^{2+} , não houve diferença estatística entre os tratamentos avaliados na camada superficial de 0,0-0,10 m. No entanto para a camada de 0,10-0,20 m, apenas as áreas de DEG e REC, diferiram das demais (Tabela 1). Os níveis presentes em todos os tratamentos estudados podem ser considerados elevados, $> 1,5 \text{ cmol/dm}^3$ (Alvarez V. et al., 1999). Resultados estes que corroboram com os encontrados por Valladares et al. (2020), os quais realizaram a caracterização de solos no núcleo de desertificação na mesma região do presente estudo e observaram teores de Mg^{2+} acima de $7,5 \text{ cmol/dm}^3$.

Menores teores de matéria orgânica do solo (MOS) foram encontrados na área DEG nas duas camadas analisadas, fato que pode ser devido à pouca vegetação existente na área, já que a perda da cobertura vegetal reduz o aporte de matéria orgânica no solo. Outros fatores agravantes que justificam os baixos teores de MOS, pode ser atribuído ao fato da camada superficial do solo, constituída por resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, ter sido removida por meio de processos de escoamento superficial e erosivos do solo, permitindo perdas consideráveis de matéria orgânica, o que justifica esta área ser um ambiente em estágio avançado de degradação.

Segundo Resende e Roselen (2011), níveis mais baixos de MOS do solo em todas as camadas podem ocorrer devido ao menor aporte de fitomassa existente em uma área. A área em REC apresentou maiores teores de MOS quando comparada à área degradada, um comportamento já esperado, uma vez que a disponibilidade de MOS é decorrente do aporte, decomposição e mineralização dos resíduos vegetais procedentes das plantas de coberturas, utilizadas na revegetação e recuperação da área de estudo. Silva (2017), ao realizar um estudo na mesma região, utilizando consórcio de Pinhão branco (*Jatropha curcas*) e *Andropogon* (*Andropogon gayanus*), observaram que após um ano de implantação do sistema os teores de MOS foram maiores do que os encontrados na área degradada.

O P respondeu de forma diferente da MO, sendo observado na MN e IDEG maiores teores na camada 0,10-0,20 m e para as áreas DEG e REC camada 0,0-0,10 m, apresentando elevados teores em todas as áreas em estudo, o que pode estar associado à herança do material de origem, devido à presença de rochas ricas em fosfatos (Valladares et al., 2020), concomitante a presença de MOS, onde com o em sua constituição se tem moléculas orgânicas com cargas negativas assim como o P, no qual competem pelo mesmo sítio de absorção e faz com que o P fique mais disponível e menos adsorvido.

Em relação à CTC encontrada nas áreas estudadas (Tabela 1), essa pode ser considerada elevada, $> 15 \text{ cmol/dm}^3$ (Alvarez V. et al., 1999), onde a maior parte das cargas dos colóides do solo do presente estudo estaria ocupada pelos macronutrientes, Ca e Mg (Figura 3). A elevada CTC e altos teores de cátions presentes no solo se devem à predominância de argila de alta atividade (2:1), o que indica baixo grau de intemperismo do solo e pode estar associado ao prolongado déficit hídrico da região e à herança do material de origem (pelitos da Formação Quiricó), que ainda preserva illita e feldspato na sua composição, com os teores de Ca^{2+} sendo comparáveis aos encontrados em solos originários de materiais calcários (Valladares et al., 2020).

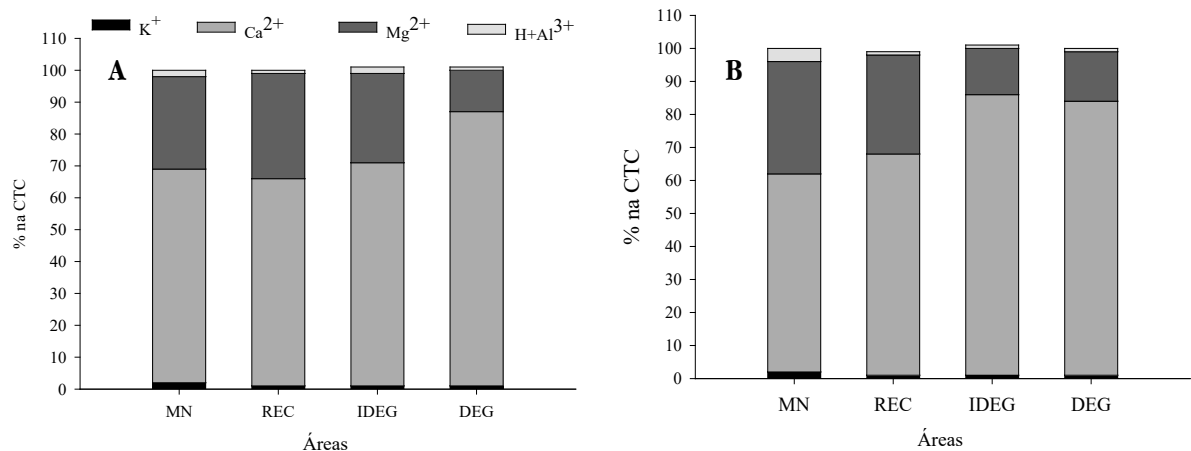


Figura 3. Percentual de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e $H+Al^{3+}$ na CTC de um solo sob diferentes níveis de degradação e camadas em Gilbués-PI. 0,00-0,10 m (A); 0,10-0,20 m (B); DEG: Área Degradada; IDEG: Área em Início de Degradação; MN: Mata Nativa; REC: Área em Recuperação.

Pode-se observar que, independentemente, das áreas e camadas avaliadas, o atributo Ca^{2+} prevalece, seguido do Mg^{2+} na CTC do solo, sendo os elementos mais abundantes em tal fração coloidal (Figura 3A-B). É importante salientar que a representação do Ca^{2+} foi acima de 80% nas áreas em IDEG (0,10-0,20 m) e DEG (0,0-0,10 e 0,10-0,20 m).

Mesmo apresentando teores considerados elevados, o K^+ ocupa uma pequena parcela da CTC do solo, com relações Ca/K e Mg/K maiores que 70 e 17, respectivamente. Essa alta relação pode influenciar na nutrição das plantas, tendo em vista que, em caso de excesso de concentração de um elemento, a absorção do outro elemento pode ser inibida (Nemeño et al., 2019). Com isso, essa relação pode ser um fator que interfere na regeneração florestal, influenciando na distribuição de algumas espécies, pois são elementos associados à germinação e crescimento das plantas (Duarte et al., 2019).

3.2 ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS

Para os atributos microbiológicos foram observadas diferença entre as áreas de MN com relação aos outros tratamentos nas variáveis RBS e CBM, na camada superior do solo (0,0-0,10 m) (Tabela 2), resultados estes que corroboram o estudo realizado por Nunes et al. (2012), que encontraram maiores valores em áreas de vegetação nativa para CBM e RBS. Outros autores também observaram maiores valores de biomassa e respiração basal nas áreas de mata nativa (Silveira, 2011; Chen et al., 2012; Araújo et al., 2014).

Tabela 2. Valores médios da Respiração Basal do Solo (RBS), Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e Quociente Metabólico (qCO_2) em duas camadas de um solo sob diferentes níveis de degradação, em Gilbués-PI.

Variável	camada (m)	Áreas				Valor 'F'
		MN	IDEG	DEG	REC	
RBS	0,00-0,10	53,64 aA	27,45 bA	23,46 bA	28,40 bA	6,46**
	0,10-0,20	28,63 aB	27,45 bA	22,21 aA	23,67 aA	
CBM	0,00-0,10	985,09 aA	426,54 bA	275,99 bA	136,36 bA	0,63*
	0,10-0,20	988,36 aA	366,54 bA	165,81 bA	244,36 bA	
qCO_2	0,00-0,10	0,005 bA	0,024 aB	0,016 aA	0,018 aA	0,46*
	0,10-0,20	0,005 bA	0,084 aA	0,012 bA	0,017 bA	

MN: Mata Nativa; IDEG: Área em Início de Degradação; DEG: Área Degradada; REC: Área em Recuperação. RBS ($mgC-CO_2 g^{-1}$ solo dia^{-1}), CBM ($mgCkg^{-1}$ solo), qCO_2 ($mg CO_2 mg^{-1}CBMdia^{-1}$). * e **: significativo ao nível de 5% ($p \leq 0.05$) e 1% ($p \leq 0.01$) de probabilidade, respectivamente pelo teste 'F'. Médias seguidas de mesma letra maiúscula, entre as camadas, e minúscula, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente no teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esses resultados demonstram que a presença da cobertura vegetal favorece o acúmulo de resíduos na superfície do solo, com consequente aumento da biomassa microbiana e respiração do solo, resultando na maior liberação de CO_2 (Kuznyakov, 2010). Além disso, o maior conteúdo de C do solo associado à vegetação nativa pode contribuir para a manutenção e crescimento da biomassa microbiana do solo, conforme relatado por Araújo et al. (2010).

As áreas IDEG, DEG e REC apresentaram o mesmo comportamento para RBS e CBM nas diferentes camadas estudadas, onde os valores diminuíram à medida que o nível de degradação aumentou (Tabela 2). Araújo et al. (2014) encontraram baixa atividade enzimática em áreas altamente degradadas, bem como em áreas com baixa taxa de degradação na região de Gilbués, onde essa atividade enzimática refletiu na atividade dos microrganismos decompositores de MOS, que influenciaram de modo positivo o estoque de C do solo, o qual serve como substrato energético para a comunidade microbiana do solo.

O qCO_2 não apresentou diferença na camada (0,10-0,20 m) nas áreas DEG, REC e MN, entretanto, a área de MN apresentou menores médias, sendo mais eficiente na utilização do carbono pela biomassa microbiana do solo. Nunes et al. (2012) realizaram um estudo sobre impacto da degradação do solo na biomassa microbiana em dois anos consecutivos, nesta mesma região do presente estudo, e observaram que o qCO_2 aumentou à medida que o nível de degradação do solo foi aumentando. Costa Neto et al. (2015) ressaltam que quanto menores os valores de qCO_2 , maior será a estabilidade do ambiente, encontrando-se mais próximo do equilíbrio, e quando os valores de qCO_2 são mais altos trata-se de um ambiente com estresse e com menor aporte de materiais orgânicos. Segundo Zhou et al. (2017), um qCO_2 mais baixo pode refletir em melhoria das condições biofísicas do solo e o qCO_2 mais alto pode indicar degradação do solo, sendo este um indicador promissor para o uso microbiano de carbono no consumo de energia.

3.3 CORRELAÇÃO DE PEARSON

Através da análise de correlação de Pearson (Figura 4), foi observado que o pH do solo se correlacionou positivamente com o P, indicando que com a elevação do pH as concentrações desse nutriente no solo são aumentadas. A alteração no pH do solo pode influenciar na absorção ou dessorção de P e, conseqüentemente, sua disponibilidade no solo. A sorção do P aumenta gradualmente com a acidificação do

solo, reduzindo assim sua disponibilidade. Com a redução de pH do solo, o P pode ser adsorvido por meio da troca de ligantes entre o P e o OH, uma vez que o OH nos colóides seriam substituídos por HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- presentes na solução do solo, o contrário pode ocorrer quando o P é liberado dos óxidos de Fe e Al devido à competição com os íons OH⁻ a pH alto, o que influencia no seu deslocamento da carga superficial dos óxidos (Bai et al., 2017).

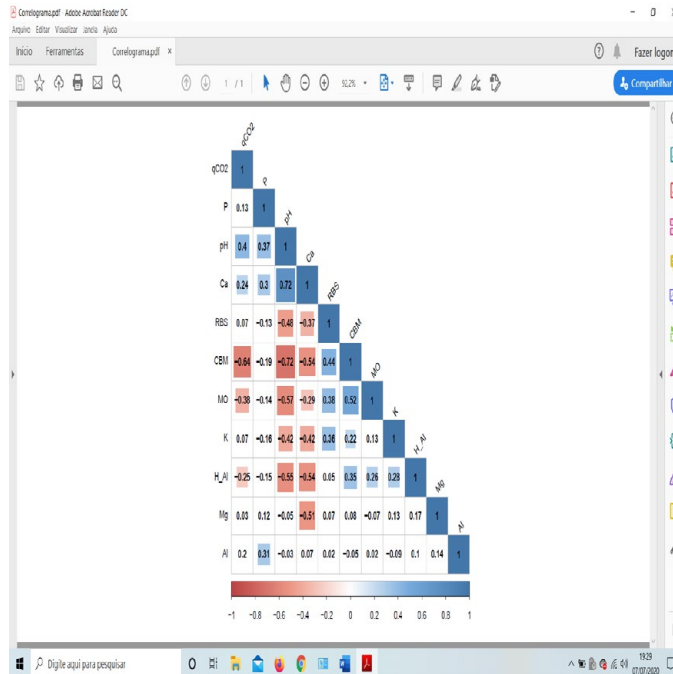


Figura 4. Correlograma de Pearson entre variáveis químicas e biológicas de um solo sob diferentes níveis de degradação na região de Gilbués-PI.

Entre pH e H^+Al^{3+} houve correlação negativa, ou seja, quanto maior acidez do solo, mais elevadas serão as concentrações de H^+Al^{3+} , de forma que o pH corresponde ao potencial hidrogeniônico, que é determinado pela concentração de íons de hidrogênio na solução do solo, quanto menor for o pH do solo, maior será a concentração de H^+ , com isso, o H^+Al^{3+} também será maior. Com a redução do pH, a disponibilidade de Ca^{2+} também será afetada, sendo reduzida conforme é reduzido o pH, devido à competição por sítios de absorção com o H^+ presente na solução do solo, explicando assim a correlação positiva entre ambas as variáveis.

Com relação aos atributos microbiológicos, a MO obteve correlação positiva com a RBS, CBM e negativa com o qCO_2 . O aumento no conteúdo de resíduos vegetais com a ocorrência de sua decomposição por meio dos microrganismos do solo, induz a maior liberação de CO_2 , expressa pela RBS, durante esse processo e parte dos resíduos degradados passam a integrar a matéria orgânica do solo, promovendo também o incremento de carbono na biomassa microbiana (Kuzyakov, 2010; Leite e Galvão, 2008).

A correlação negativa entre MO e qCO_2 reflete um comportamento de equilíbrio da biomassa microbiana, onde se observaram maiores teores de MO nas áreas estudadas, sendo mais eficiente que em áreas com baixas teores de MO, evidenciando um estresse devido à deficiência da principal fonte energética dos microrganismos. Em trabalho avaliando o qCO_2 , Jia e Liu (2017) também observaram correlação negativa e positiva com a MO e o CBM, respectivamente.

A MO e o pH do solo apresentaram correlação negativa, indicando que ao se incrementar MO ao solo o pH será reduzido, ou seja, esse solo tem a tendência de elevar sua acidez. A intensidade de acidificação dependerá da quantidade de MO adicionada como também de suas características estruturais,

já que material orgânico de alta massa molecular, devido a difícil dissolução ou decomposição, pode ter efeito reduzido sobre o pH, sendo que o pH do solo será elevado de forma gradual de acordo com a decomposição do material orgânico, tendo em vista que o responsável pela acidificação do solo é a produção de ácidos orgânicos liberados durante a decomposição da MO, através dos grupos carboxílicos que são dissociados, a complexação do Al^{3+} , troca de ligantes entre ânions orgânicos e grupos OH de sesquióxidos e a descarboxilação de ânions orgânicos (Yan et al., 1996; Pavinato e Rosolem, 2008).

o pH foi bastante influenciado positivamente na DEG e REC, sendo este um dos parâmetros mais facilmente mensurável para a determinação da qualidade do solo (Czerwonka et al., 2017; Grzadziel et al., 2019).

A existência de correlação negativa entre a RBS e o Ca^{2+} pode ser explicada pela reação química que ocorre entre o CO_2 e Ca, na qual a elevação da RBS (taxa de respiração CO_2 -C) pode ocasionar redução nos teores de Ca, devido a liberação de CO_2 existente durante a oxidação biológica de compostos orgânicos que contêm Ca, no qual através de reações pode resultar na formação de $CaCO_3$, que é uma molécula menos solúvel que as formas orgânicas de Ca (Pavinato e Rosolem, 2008).

As variáveis microbiológicas RBS e CBM foram relacionadas positivamente na área de MN. Resultados semelhantes foram observados por Novak (2017). Esses resultados sugerem que um conjunto maior e a diversidade em ecossistemas naturais favorecem a manutenção de atributos químicos e microbiológicos do solo (Alves et al., 2011), principalmente em áreas de vegetação nativa. Com o aumento positivo estando intimamente relacionado às áreas sob algum nível de degradação, o que reforça ser uma variável importante para avaliação de ambiente em desequilíbrio biológico.

A área em processo de recuperação (REC) foi mais influenciada pela variável microbiológica qCO_2 , isso pode estar fortemente ligado com a vegetação utilizada para a restauração do solo, que por sua vez, está fortemente relacionada com reabilitação da atividade microbiológica do solo (Li et al., 2016).

4 CONCLUSÕES

O pH e a matéria orgânica do solo foram as variáveis que mais influenciaram nos atributos químicos e biológicos do solo, de forma que ambos se correlacionaram com a maioria dos atributos estudados, evidenciando que são os principais atributos do solo a serem considerados quando se visa a melhoria da qualidade do solo em áreas degradadas.

Contudo, ficou evidenciado, principalmente nos níveis de matéria orgânica, a importância de manter as condições adequadas para a preservação de áreas nativas, como também a recuperação de áreas em avançado processo de degradação, acometidas por fatores bióticos e abióticos do ambiente.

A existência de um solo com a presença de níveis considerados muito bons e elevados de nutrientes essenciais para diversas culturas e livre de elementos considerados tóxicos não é o suficiente para evitar que o processo de degradação ocorra e/ou para recuperação de áreas degradadas, aliados ao fator químico do solo se faz necessária a melhoria das condições biológicas.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. D.; BARROS, N. D.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. **Interpretação dos resultados das análises de solos**. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, v. 5, p. 25-32, 1999.

- ARAÚJO, A. S. F.; BORGES, C. D.; TSAI, S. M.; CESARZ, S.; EISENHAUER, N. Soil bacterial diversity in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 106, n. 5, p. 891-899, 2014. doi: 10.1007/s10482-014-0258-5
- BAI, J.; YE, X.; JIA, J., ZHANG, G.; ZHAO, Q.; CUI, B.; LIU, X. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. **Chemosphere**, v. 188, p. 677-688, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.117>
- COSTA, C. R. G.; FRAGA, V. S.; LAMBAIS, G. R.; SOARES, K. O.; SUDDARTH, S. R. P.; MEDEIROS, S. S. Chemical and Physical Quality of the Entisol in a Natural Regeneration Area in the Semiarid Region of Paraíba. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 1 p. 1-7, 2019. doi: 10.9734/jeai/2019/v35i230202
- DUARTE, S. W.; HOFFMANN, L. T.; MACANEIRO, J. P.; FENILLI, T.; SCHORN, L. A. Effects of the environment and spatial factors on the regeneration of araucaria forest fragments, southern brazil. **Applied ecology and environmental research**, v. 17, n. 4, 9577-9589, 2019.
- HUSSON, F.; LE, S.; P. PAGES, J. **Package 'FactoMineR'. Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining**. 2017. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>. Acesso em: 04 Ago. 2020.
- JIA, G.; LIU, X. Soil microbial biomass and metabolic quotient across a gradient of the duration of annually cyclic drainage of hillslope riparian zone in the three gorges reservoir area. **Ecological Engineering**, v. 99, p. 366-373, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.063>.
- KUZYAKOV, Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363-1371, 2010.
- LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.
- LEITE, L. C.; GALVÃO, S. R. S. Matéria Orgânica: Funções, Interações e Manejo. In: ARAÚJO, A. S. F.; LEITE, L. C.; NUNES, L. A. P. L.; CARNEIRO, R. F. V. (Eds). **Matéria Orgânica e Organismos do Solo**. Teresina – PI: EDUFPI, 220p, 2008.
- LIMA, L. A. L. **Desertificação no semiárido brasileiro: o papel dos microrganismos no processo de recuperação de áreas degradadas**. 55 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- LOPES, L. S. O.; SANTOS, R. W. P.; FILHO, M. A. M. NÚCLEO DE DESERTIFICAÇÃO DE GILBUÉS (PI): CAUSAS E INTERVENÇÕES. **Geografia**, v. 20, p. 53–66, 2011.
- MACHADO, D. F. T.; CONFESSOR, J. G.; RODRIGUES, S. C. Processo inicial de recuperação de área degradada a partir de intervenções físicas e utilização de leguminosas. **Caderno de Geografia**, v. 24(1) número especial, 2014.
- MEDEIROS, R. M.; SILVA, V. M. A.; MELO, V. S.; MENEZES, H. E. A.; MENEZES, H. E. A. Diagnóstico e tendência da precipitação pluvial em Bom Jesus, Piauí, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.11, p. 115-121, 2016.
- MUNIZ, A. W.; NUNES, R. H. S.; SILVA, T. A. C.; SÁ, E. L. C.; MAJOLO, C.; FIUZA, A. B.; CAVALLAZZI, J. R. P. No-tillage effect on carbon and microbiological attributes in corn grown in Manaus-AM, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**. v. 13, n. 2, p. 77-81, 2018.

NEMEÑO, G. A.; SANCHEZ, P. B.; PATERNO, E. S.; BADAYOS, R. B.; CRUZ, P. C. S. Nutrient dynamics and uptake of rice in irrigated lowland soils of agusan del norte subjected to episodic flooding. **Journal of The International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences**, v. 25, n. 2, p. 31-44, 2019.

NUNES, J. S.; ARAUJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; LIMA, L. M.; CARNEIRO, R. F. V.; SALVIANO, A. A. C.; TSAI, S. M. Impact of land degradation on soil microbial biomass and activity in Northeast Brazil. **Pedosphere**, v. 22, n. 1, p. 88-95, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60194-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60194-X)

OLIVEIRA, S.; SILVA, D. M. S.; SANTOS, L. R.; MARQUES, D. C. S.; ARAÚJO, J. L. S.; SALDANHA, E. C. M. Análise de atributos químicos do solo em áreas cultivadas com grãos no nordeste paraense, utilizando agricultura de precisão. **Agroecossistemas**, v. 5, n. 1, p. 1-6, 2013.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.

SCHERR, S. J. A futura segurança alimentar e as consequências econômicas da degradação do solo no mundo em desenvolvimento. Em resposta à degradação da terra; **Oxford Press**: Nova Deli, Índia, p. 155-170, 2021.

SigmaPlot, V. 10.0, Systat Software. Inc., San Jose, CA, 95110. 2007.

SILVA, M. D. **Atributos químicos e biológicos de um neossolo litólico eutrófico com exposição do horizonte "c", cultivado com pinhão manso e gramíneas, em área degradada no município de Gilbués**, PI. 2017.

SWANEPOEL, C. M.; LAAN, M. V. D.; WEEPENER, H. L.; DU PREEZ, C. C.; ANNANDALE, J. C. Review and meta-analysis of organic matter in cultivated soils in Southern Africa. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 104, n. 2, p. 107-123, 2016.

TEXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa. 573 p, 201

VALLADARES, G. S., JÚNIOR, A. F. R., AQUINO, C. M. S. Caracterização de solos no núcleo de desertificação de Gilbués, Piauí, Brasil, e sua relação com os processos de degradação. **Physis Terrae-Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 115-135, 2020.

VASU, D.; TIWARI, P.; CHANDRAN, P.; SINGH, S. K. Soil Quality for Sustainable Agriculture. In: **Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production**. Springer, Singapore, p. 41-66, 2020. doi:10.1007/978-981-13-8660-2_2

YAN, F.; SCHUBERT, S.; MENGEL, K. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. **Soil Biology & Biochemistry**. V. 28, n. 4/S, p. 611-624, 1996.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and a precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p. 1467- 1476, 1988.

ZHOU, H.; ZHANG, D.; WANG, P.; LIU, X.; CHENG, K.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHANG, X.; ZHENG, J.; CROWLEY.; VAN ZWIETEN, L; PAN, G. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A Meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 239, p. 80-89, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.0060167-8809>.