Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Pedogênese de Vertissolos em ambientes de formação contrastantes

Glêvia Kamila Lima

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2018

Glêvia Kamila Lima
Engenheira Agrônoma

Pedogênese de Vertissolos em ambientes de formação contrastantes
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TIAGO OSÓRIO FERREIRA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Lima, Glêvia Kamila

Pedogênese de Vertissolos em ambientes de formação contrastantes /
Glêvia Kamila Lima. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr
6018 de 2011 - - Piracicaba, 2018.

113 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz".

1. Solos expansivos-contráteis 2. Alumínio 3. Interestratificados 4. Matéria
orgânica I. Título

DEDICATÓRIA

À minha avó Antônia David de Lima.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), ao programa de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, e aos docentes do programa, em especial aos professores Alvaro Pires, Leonel Libardi, Miguel Cooper e Pablo Vidal Torrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade e financiamento do doutorado sanduíche.

À Universidade de Santiago de Compostela (USC), em especial ao prof. Dr. Xosé Lois Otero Pérez, pela receptividade, apoio, conversas e presença durante minha estadia na USC, além da Maria Santiso, do David e demais colegas. Ao pessoal do PDSE que foram imprescindíveis durante minha estadia em Santiago de Compostela.

Ao meu orientador o prof. Dr. Tiago Osório Ferreira, pela paciência, confiança e direcionamentos. Ao prof. Dr. Marcelo Metri Corrêa, a profa. Dra Célia Regina e ao prof. Gabriel Ramatis.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo e do Nupegel, Débora, Luiz Silva, Néia, Marina, Rossi, Dorival e Leandro.

As minhas amigas e parceiras Alexys Boim, Thaís Pessoa, Eloá Moura e Leticia de Pierri, pelos incentivos, apoio, e presença continua.

Aos meus amigo(a)s e colegas de pós-graduação, Isabela Mello, Marcela Araújo, Sara Duarte, Beatriz Motta, Daiana Bambi, Maristela, Nayana, Luciana Arruda, Ana Teles, Karina, Arnaldo, Márcio, Verena, Paulo, Carol, Juliana, Marta, Rafaela, Taciana, Anna Bárbara, Mariana Chiapini, Edson, Virginia.

Aos membros do grupo de pesquisa GEPGeoq, Danilo, Gabriel, Lucas, Hermano, Geraldo, Thayana, Verônica, Laís.

À minha família, em especial a minha avó Antônia, a minha tia Mércia, a minha mãe Maria das Graças, a meus irmãos Glêvio e Glênio, pelo apoio continuo.

À Deus.

Aos não citados, mas importantes.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. OCORRÊNCIA, DEFINIÇÃO E CRITÉRIOS DIAGNÓSTICOS	13
2.2. GÊNESE, MODELOS EXPLICATIVOS DAS FEIÇÕES MORFOLÓGICAS E COMPORTAMENTO VÉRTICO	13
2.3. ESPÉCIES MINERAIS E DIVERSIDADE MINERALÓGICA DE VERTISSOLOS	14
2.4. VERTISSOLOS EBÂNICOS	17
2.5. VERTISSOLOS ÁCIDOS	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. VERTISSOLOS ÁCIDOS	21
3.1.1. ÁREA DE ESTUDO	21
3.1.2. ANÁLISES LABORATORIAIS	21
3.1.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	23
3.2. VERTISSOLOS COM PREDOMÍNIO DE CAULINITA NA FRAÇÃO ARGILA	23
3.2.1. ÁREA DE ESTUDO	23
3.2.2. ANÁLISES LABORATORIAIS	24
3.3. VERTISSOLOS EBÂNICOS	25
3.3.1. ÁREAS DE COLETA E DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA	25
3.3.2. ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS	26
3.3.3. TEORES TOTAIS DE CARBONO (C), NITROGÊNIO (N) E ENXOFRE (S), ÍNDICE MELÂNICO (IM), COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DE CARBONO 13 ($\delta^{13}\text{C}$) E RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR DE CARBONO 13 (RMN ^{13}C)	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. VERTISSOLOS ÁCIDOS	31
4.1.1. FRACIONAMENTO QUÍMICO DO ALUMÍNIO (AL) E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO PERFIL	33
4.1.2. FRACIONAMENTO QUÍMICO DO AL PARA OS HORIZONTES ÁCIDOS	37
4.1.3. SEGUNDO FRACIONAMENTO QUÍMICO DO AL PARA OS HORIZONTES ÁCIDOS	41
4.1.4. MODELO PROPOSTO DA GERAÇÃO DA ACIDEZ NO VERTISSOLO ÁCIDO	44
4.2. VERTISSOLOS COM PREDOMÍNIO DE CAULINITA NA FRAÇÃO ARGILA	46
4.3. VERTISSOLOS EBÂNICOS	54
4.3.1. ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS, FÍSICOS, QUÍMICOS E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	54
4.3.2. QUANTIDADE DE CARBONO, NITROGÊNIO E ENXOFRE, E TIPO DE GRUPOS FUNCIONAIS DA MATÉRIA ORGÂNICA	59
4.3.3. ASSEMBLEIA MINERALÓGICA DAS FRAÇÕES AREIA, SILTE, ARGILA E MATERIAL DE ORIGEM	63
4.3.4. ASSEMBLEIA MINERALÓGICA, TRANSFORMAÇÕES MINERALÓGICAS E AUTIGÊNESE DE MINERAIS	73
4.3.5. GÊNESE DE VERTISSOLOS EBÂNICOS	75
5. CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICES	89

RESUMO

Pedogênese de Vertissolos em ambientes de formação contrastantes

Os Vertissolos apresentam alto potencial para a produção agrícola e para estocar carbono. No entanto, diversos aspectos sobre sua gênese, fundamentais para qualidade e sustentabilidade do solo, permanecem incompreendidos. As várias lacunas sobre suas características particulares estão relacionadas ao incomum teor de alumínio trocável; a manifestação de feições morfológicas e vérticas em uma matriz inorgânica dominada por fases cauliniticas; e a preservação e estoque de carbono em condições climáticas de semiárido e temperado. Dessa forma, os objetivos deste estudo foram (i) investigar a gênese de um Vertissolo ácido, bem como os fatores e mecanismos da geração dessa acidez, (ii) compreender o papel dos interestratificados no desenvolvimento das feições vérticas em Vertissolo com predomínio de caulinita na fração argila, e (iii) investigar os fatores e mecanismos que promovem a gênese de Vertissolos Ebânicos sob diferentes condições climáticas no Brasil. Amostras de seis perfis de Vertissolos foram utilizadas, sendo quatro Ebânicos e dois Háplicos, ambos localizados entre as regiões nordeste, sudeste e sul do Brasil. Análises morfológica, físicas, químicas, mineralógicas e isotópicas foram realizadas. Na modelagem dos difratogramas foi utilizado o programa Newmod. Para identificação dos grupos funcionais orgânicos do solo realizou-se a ressonância magnética nuclear da fração ácido húmico, e a subtração espectral. Todos os Vertissolos apresentaram textura de argilosa a muito argilosa, consistência seca variando de dura a extremante dura e consistência molhada entre muito plástica e muito pegajosa. Os valores de pH variaram entre ácido e alcalino. Foram eutróficos, com predomínio de cálcio no complexo de troca na maioria dos perfis. O teor de carbono reduziu em profundidade, não mascarou o potencial de contração e expansão, e promoveu melhorias na agregação, principalmente nos horizontes superficiais. Houve autigênese de minerais, os minerais primários predominaram nas frações areia e silte, e na fração argila espécies de esmectitas dioctaedrais. Independente da espécie esmectítica e do tipo de vegetação (plantas C3 e/ou C4) houve maior diversidade de grupos funcionais nos horizontes superficiais. O mecanismo de estabilização do carbono nos Vertissolos Ebânicos ocorreu por meio da interação entre as fases inorgânicas e orgânicas, mediada por pontes de cátions polivalentes não metálicos e metálicos, e também por interação eletrostática entre os constituintes inorgânicos e orgânicos. A manifestação das feições morfológicas e vérticas no Vertissolo com predomínio de caulinita na fração argila foi gerada pelos interestratificados caulinita-montmorilonita resultantes da perda da lâmina tetraedral das esmectitas via transformações no estado sólido. A acidez no Vertissolo ácido foi gerada pela hidrólise e dissolução das fases minerais mediados por um clima passado mais úmido e continuado pelo clima atual úmido, sendo os teores de alumínio trocável naturais. Nesse contexto, esse estudo contribui com avanços na gênese, mineralogia e mecanismos de estabilização do carbono no solo, os quais são temáticas relevantes desse milênio e contribui a outras áreas científicas.

Palavras-chave: Solos expansivos-contráteis; Alumínio; Interestratificados; Matéria orgânica

ABSTRACT

Pedogenesis of Vertisols in contrasting environments formation

Vertisols have high potential for agricultural production and for carbon stocking. However, several aspects about its genesis, fundamental to soil quality and sustainability, remain misunderstood. The various gaps on its particular characteristics are related to the unusual exchangeable aluminum content; the manifestation of morphological and vertic features in an inorganic matrix dominated by kaolinitic phases; and the preservation and stocking of carbon in semi-arid and temperate climatic conditions. Thus, the aims in this study were to (i) investigate the genesis of an acidic Vertisol, as well as the factors and mechanisms of the acidity generation, (ii) understand the role of the interstratified clay minerals in the development of vertic features in a kaolinitic Vertisol, and iii) investigate the factors and mechanisms that promote the genesis of Pellic Vertisols under different climatic conditions in Brazil. Samples of six profiles of Vertisols were used, being four Pellic and two Haplic, both located between the northeast and southern regions of Brazil. Morphological, physical, chemical, mineralogical and isotopic analyzes were performed. In the modeling of the diffractograms, the Newmod program was used. For the identification of the organic functional groups of the soil, the nuclear magnetic resonance of the humic acid fraction and the spectral subtraction were performed. All the Vertisols presented a texture of clayey to very clayey, dry consistency ranging from hard to extremely hard and wet consistency between very plastic and very sticky. The pH values varied between acid and alkaline. They exhibit high base saturation, with the predominance of calcium in the exchangeable complex in most of the profiles. The carbon content reduced in depth; did not overlap the shrinking-swelling potential; and promoted improvements in aggregation, especially in the upper horizons. There was autigenesis of minerals, primary minerals predominated in the sand and silt fractions, and in the clay fraction species of dioctahedral smectites. Regardless of the smectic species and the type of vegetation (C3 and/or C4 plants), there was a greater diversity of functional groups in the superficial horizons. The mechanism of carbon stabilization in the Pellic Vertisols occurred through the interaction between inorganic and organic phases, mediated by bridges of non-metallic and metallic polyvalent cations, and by electrostatic interaction between inorganic and organic constituents. The manifestation of the morphological and vertic features in the kaolinitic Vertisol was generated by the interstratified kaolinite-montmorillonite resulting from the loss of the tetrahedral sheet of smectites by solid-state transformations. The acidity in the acid Vertisols was generated by the hydrolysis and dissolution of the mineral phases mediated by a humid past climate and continued by the current humid climate, being the exchangeable aluminum contents natural. In this context, this study contributes to advances in the genesis, mineralogy, and mechanisms of soil carbon stabilization, which are relevant themes of this millennium and contribute to other scientific areas.

Keywords: Shrinking-Swelling soils; Aluminium; Interstratified; Organic matter

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente os Vertissolos abrangem aproximadamente 2,4% (335 milhões de hectares) da superfície terrestre. No Brasil, ocupam cerca de 4,5 milhões de hectares e estão presentes em todas as regiões geográficas (Benedetti et al., 2008; Dudal and Eswaran, 1988).

Os Vertissolos apresentam alto potencial produtivo (FAO, 2014), e são solos que contribuem para produção alimentícia e energética em vários países, tais como Índia, Austrália e Estados Unidos, os quais são os países com maiores áreas de Vertissolos (USDA, 1999). Em 2050 a população mundial será de aproximadamente 9 bilhões de indivíduos e a proporção de áreas degradadas aumentará. Dessa forma, o conhecimento dos atributos e comportamento dos solos são essenciais para manutenção de sua qualidade, manejo e utilização, visando a sustentabilidade.

Apesar da elevada fertilidade natural algumas propriedades físicas dos Vertissolos podem ser tidas como limitantes, tais como; a textura argilosa a muito argilosa, o predomínio de argilominerais expansíveis, a consistência dura no estado seco, a plasticidade e pegajosidade quando molhados, além das baixas taxas de permeabilidade (Aydinalp, 2010; FAO, 2014). Em função destas limitações, se faz necessária uma gestão diferenciada de Vertissolos destinados para fins agrícolas e não agrícolas (Fredlund, 1996). As alterações de volume devido às variações de umidade acarretam danos a fundações, edifícios, estradas, linhas de transmissão, oleodutos e gasodutos que gera custos de reparos de cerca de bilhões de dólares anualmente (Shamrani et al., 2010).

Devido sua constituição mineralógica, os Vertissolos apresentam normalmente alta capacidade de troca de cátions (CTC) e minerais do tipo 2:1, o que lhes proporciona elevada capacidade de adsorver compostos potencialmente tóxicos, como pesticidas e elementos traço (Kampf and Curi, 2003; Kumar et al., 2015).

De fato, por muito tempo, sua mineralogia foi considerada predominantemente esmectítica (Eswaran et al., 1999). Entretanto, pesquisas mais recentes (Bouna et al., 2012; Heidari et al., 2008; Pal et al., 2012) apontam uma grande diversidade mineralógica. Caulinita, vermiculita e paligorskita vêm sendo citados como argilominerais dominantes (Barbiero et al., 2010; Heidari et al., 2008; Yerima et al., 1987), além da ocorrência de interestratificados esmectita/caulinita, esmectitas e vermiculitas com hidróxi-Al nas entrecamadas (Pal et al., 2012, 2009) e montmorilonita (Moustakas, 2012). Entretanto, estudos pedogenéticos e mineralógicos aprofundados sobre Vertissolos nos trópicos são escassos, especialmente no Brasil.

Quimicamente comumente esses solos apresentam CTC e saturação por bases elevadas (Chittamart et al., 2010) sendo normalmente neutros ou alcalinos (Coulombe et al., 1996). Entretanto, podem ocorrer condições ácidas nos horizontes superficiais ou em todo o perfil

(Coulombe et al., 1996). Alguns trabalhos (Ahmad, 1985; Barbiero et al., 2010; Cunha et al., 2000; Ribeiro et al., 1990) relatam tal particularidade, no entanto as causas da acidez permanecem desconhecidas. São levantadas algumas possibilidades para explicar tal característica como, a natureza ácida do material de origem, decarbonatação do perfil em climas úmidos com atuação da hidrólise e ferrólise (Barbiero et al., 2010; Coulombe et al., 1996).

Os Vertissolos apresentam alto potencial para sequestrar carbono de forma eficiente (Hua et al., 2014), embora apresentem coloração escura, os teores de carbono orgânico normalmente variam de 1 a 3 dag kg⁻¹ (Eswaran et al., 1999). Estudos sugerem que sua melanização está relacionada a associação entre os constituintes orgânicos e minerais esmetíticos (Dudal and Eswaran, 1988; Eswaran et al., 1999). No entanto os mecanismos de estabilização da matéria orgânica (MO) são pouco compreendidos nesses solos.

A partir da análise bibliométrica das publicações sobre Vertissolos em meio século de pesquisas (1966 a 2015) pela base de dados (Scopus) usando uma combinação de palavras, verificou-se que dentre as áreas de conhecimento (manejo ou fertilidade: MTF; matéria orgânica ou biochar ou carbono: OMBC; química: chemic; física: phisic; mineralogia: mineralog) trabalhos relacionados a gênese e pedogênese estão entre os menos expressivos (Figura 1).

Figura 1. Sequência evolutiva de publicações sobre Vertissolos em diversas áreas científicas.

Dentre as classes de solos com maior número de publicações sobre gênese e pedogênese entre 1953-2015, a classe dos Vertissolos situou-se na sexta posição, com apenas 139 publicações (Figura 2). Os Espodossolos, Chernossolos, Neossolos, Cambissolos e Luvissolos foram as classes com maiores número de publicações (Figura 2).

Figura 2. Número de publicações sobre gênese e pedogênese por classe de solo até o ano de 2015.

A análise bibliométrica das publicações sobre Vertissolos evidencia lacunas que podem ser exploradas (Figura 3). Dentre elas, destaca-se a carência de estudos de pedogênese de Vertissolos Ebânicos, ácidos e caulíníticos.

Figura 3. Alguns dos assuntos com lacunas sobre Vertissolos, 1974-2015.

Os Vertissolos normalmente apresentam esmectita como mineral dominante, estas podem estar associada a outros minerais e ou ser acessório (Pal et al., 2012). A caulinita é menos citada, e

existem poucos trabalhos que a indicam como predominante na fração argila de Vertissolos (Barbiero et al., 2010).

Estudos de gênese e pedogênese são fundamentais ao entendimento do comportamento, dinâmica, adequabilidade do uso e manejo, predição de tendências e sustentabilidade dos recursos naturais.

Tendo em vista o exposto, as hipóteses foram:

I-) A ferrólise e a presença de materiais sulfídricos podem contribuir para geração da acidez em Vertissolos ácidos.

II-) A presença e o tipo de interestratificado caulinita-esmectita são os responsáveis pela feições vérticas em Vertissolos com predomínio de caulinita na fração argila;

III-) A coloração dos Vertissolos Ebânicos está condicionada por grupos funcionais específicos da matéria orgânica e pelo tipo de argilominerais, bem como pela interação entre ambos.

Sendo os objetivos:

I-) Investigar a gênese de Vertissolos ácidos, bem como os fatores e mecanismos da geração de sua acidez.

II-) Compreender o papel de interestratificados (caulinita-montmorilonita) no desenvolvimento das feições vérticas em Vertissolos com predomínio de caulinita na fração argila.

III-) Investigar os fatores e mecanismos que promovem a gênese de Vertissolos Ebânicos sob diferentes condições climáticas no Brasil e como se dá o mecanismo de estabilização do carbono com a fase sólida inorgânica em Vertissolos Ebânicos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Ocorrência, definição e critérios diagnósticos

Black cracking clays (Uganda), Melanites (Gana), Adobe soils (Estados Unidos da América-EUA, Filipinas), Rendzina (EUA), Tirs (Marrocos), Grumusols (EUA) e Margalite (Indonésia) são alguns dos antigos nomes utilizados para designar a classe dos Vertissolos. São termos que variam conforme a localidade e expressam características morfológicas e de uso (Dudal and Eswaran, 1988; FAO, 2014; USDA, 1999).

Os Vertissolos abrangem aproximadamente 2,4 % da superfície terrestre (335 milhões de hectares). As maiores áreas situam-se na Austrália (80 milhões de ha), Índia (79 milhões de ha), Sudão (50 milhões de ha), EUA (18 milhões de ha) e Chad (16.5 milhões de ha) (Dudal and Eswaran, 1988; FAO, 2014; USDA, 1999). No Brasil ocupam cerca de 4,5 milhões de ha e estão presentes em todas as regiões (Benedetti et al., 2008; Dudal and Eswaran, 1988).

A relação entre a composição matricial e os ciclos de umedecimento e secagem acarreta no fenômeno de contração e expansão, o qual conduz ao desenvolvimento de feições morfogenéticas como autogranulação, rachaduras, fendas, slickensides, agregados cuneiformes/paralelepípedicos, e microrrelevo gilgai (EMBRAPA, 2013; USDA, 1999).

O termo Vertissolo, deriva do latim *vertere*, denota inverter, girar (FAO, 2014). Refere-se à movimentação da massa do solo em função de alterações em seu volume via hidratação e desidratação de seus constituintes (FAO, 2014). A ordem dos Vertissolos se caracteriza por solos que apresentam o conteúdo de argila igual ou superior a 30% em todos os horizontes, horizonte vértico, ausência de gradiente textural, e cuja mineralogia da fração argila se destacam as espécies minerais do grupo da esmectita, podendo ocorrer caulinita e outras espécies minerais (Pal et al., 2012; USDA, 1999).

2.2. Gênese, modelos explicativos das feições morfológicas e comportamento vértico

O alto conteúdo de esmectita, juntamente com material de origem rico em cátions básicos, alternância de ciclos de umedecimento e secagem, posição inferior no relevo, drenagem e lixiviação restritas são as principais razões citadas como sendo uma das responsáveis pela gênese de Vertissolos (Moustakas, 2012).

Os principais processos pedogenéticos citados como responsáveis pela gênese dos Vertissolos são: Argiloturbação (Coulombe et al., 1996; Graham et al., 2017; Schaetzl and Anderson,

2005), Mecanístico (Nordt et al., 2004), Erosional aliado à argiloturbação (Buol et al., 2011). E os principais modelos citados como sendo os responsáveis pelas feições morfológicas dos Vertissolos são: Modelo de autoinversão, Modelo mecânico, Modelo de carregamento diferencial (Wilding and Tessier, 1988) e Modelo de (argilo)pedoturbação (Schaetzl and Anderson, 2005).

Modelo de autoinversão: solos com alto potencial de contração e expansão, quando secos, desenvolvem rachaduras, o preenchimento dessas fendas por materiais da parte superior e adjacentes, acarreta em problemas espaciais após o umedecimento do solo. As pressões de expansão são atenuadas pela movimentação oblíqua e ascendente da massa do solo, que resulta na formação dos slickensides e com a repetição desses ciclos ao longo do tempo desenvolve-se o gilgai (Wilding and Tessier, 1988).

Modelo mecânico: se relaciona com a capacidade do solo em resistir a pressões laterais e verticais. Quando a pressão de expansão gerada pelo umedecimento da massa do solo é maior que a força de cisalhamento do solo, e o estresse vertical é limitado, ocorre a formação de falhas ao longo do plano de cisalhamento (geração de slickensides), em função do alívio do estresse o qual é dissipado pelo movimento ascendente da massa do solo (Wilding and Tessier, 1988).

Modelo de argiloturbação ou argilopedoturbação: as argilas expansivas, normalmente as do grupo das esmectitas, aliado aos ciclos de umedecimento e secagem, propiciam a contração e expansão da massa do solo, e o consequente desenvolvimento de feições vérticas (Schaetzl and Anderson, 2005).

O fenômeno de contração e expansão (FCE) é importante em Vertissolos por influenciar seu comportamento e em sua classificação (Dasog et al., 1988; Wilding and Tessier, 1988), e pode ser aferido pelo coeficiente de extensibilidade linear (COLE) (Franzmeier and Ross Jr, 1968; Van Breemen and Buurman, 1998).

Os fatores que afetam o FCE são: umidade do solo, concentração eletrolítica, tipo e concentração de cátions, quantidade e tipo de argila, conteúdo de matéria orgânica e de carbonatos, quantidade de areia e silte, microestrutura, ciclos de umedecimento e secagem, espessura dos horizontes (pressão de sobrecarga), além de clima, declividade, vegetação, práticas de manejo (Wilding and Tessier, 1988) e quantidade de materiais amorfos na fração argila (Wan et al., 2002).

2.3. Espécies minerais e diversidade mineralógica de Vertissolos

Vertissolos possuem assembleia mineralógica complexa, que normalmente apresentam minerais primários, minerais expansivos (grupo esmectita), podendo ainda ocorrer caulinita e óxidos de ferro (Tabela 1). A predominância de esmectita em Vertissolos é comum (Blokhuys et al., 1990;

Dudal and Eswaran, 1988; Eswaran et al., 1999; Wilding and Tessier, 1988), no entanto, esmectita refere-se a um grupo de minerais do tipo 2:1 constituído por diferentes espécies minerais di e trioctaedrais (Borchardt, 1989).

A montmorilonita, a beidelita e a nontronita, são espécies de esmectitas dioctaedrais que podem ser encontradas em Vertissolos (Coulombe et al., 1996; Pal et al., 2012). Dessas, a nontronita é considerada a de ocorrência menos comum (Borchardt, 1989). Além desses minerais, pode ainda ocorrer a presença de interestratificados formados por diferentes espécies minerais (Coulombe et al., 1996; Pal et al., 2009).

Diversos trabalhos evidenciam a forte expressão de esmectitas em Vertissolos de forma isolada ou em associação a outros minerais (Tabela 1). Na Macedônia, Vertissolos derivados de distintos materiais de origem (sedimentos argilosos e andesito) e condições climáticas apresentaram montmorilonita e interestratificado ilita-montmorilonita, como argilominerais predominantes na fração argila (Dalibor et al., 2012). No Irã, Vertissolos derivados de sedimentos calcários e vulcânicos, em climas diferentes apresentaram maior variabilidade mineralógica, tendo como representantes principais, paligorskita, clorita, vermiculita, esmectita e como acessórios ilita e caulinita (Heidari et al., 2008).

Em Vertissolos da Grécia, foi evidenciado o predomínio de montmorilonita; caulinita, ilita e vermiculita como acessórios derivados de material aluvial (Moustakas, 2012). Na Servia, sob distintos material de origem, a montmorilonita foi o constituinte principal (Djordjevic et al., 2012). Em Taiwan, a assembléia mineralógica foi constituída por esmectita, vermiculita, caulinita, interestratificado caulinita-esmectita e ilita (Pai et al., 1999).

Em Vertissolos de El salvador, a caulinita está dentre os argilominerais predominantes na fração argila (Yerima et al., 1987). No Brasil, na região nordeste a mineralogia de Vertissolos foi caracterizada pela presença de beidelita, montmorilonita, vermiculita, ilita e caulinita em clima úmido na Bahia, enquanto que em clima semiárido na Bahia, ocorreram montmorilonita e caulinita (Lima, 2014). Nontronita, vermiculita e ilita ocorreram sob clima semiárido em Pernambuco (Lima, 2014).

Tabela 1. Assembleia mineralógica de horizontes vérticos de Vertissolos a nível mundial.

Continentes/Países	Mineralogia	Teste de Greene-Kelly (G-K) ou reflexão 060 (060)	Referências
AMÉRICA DO NORTE			
EUA, Califórnia	Esm., Ct., Mica, Plag., Qz		(Graham et al., 2017)
EUA, Califórnia	Esm. trioctaedral, Verm., Ct., Biotita, Plag., Pirox., Mag., Qz	(060)	(Hawkins and Graham, 2017)
EUA, Kansas	Esm., Ct, Mica, Fd		(Hartley et al., 2014)
EUA, Texas	Esm., Biotita		(Nordt et al., 2004)
México	Esm., Verm., Ilita, Crist., Qz, Fd, Gt., vidro vulcânico		(Sotelo-Ruiz et al., 2013)
México	Esm., Verm., Qz, Fd, Calcita, Dolomita		(Sotelo-Ruiz et al., 2013)
AMÉRICA DO SUL			
Argentina	Esm., Ilita, Ct.		(Stephan et al., 1983)
Brasil, Roraima-RR	Esm., Ct.		(Benedetti et al., 2011)
Brasil, Fernando de Noronha-PE	Esm. (carga tetraedral), Ct, Ilita, Ilm., Mag., Mica, Fd	G-K	(Marques et al., 2014)
Brasil, Cachoeirinha-PE	Nont., Mont., Verm., Ilita, Inters, Anf., Mica, Fd, Mag., Qz	G-K, FTIR	(Lima, 2014)
Brasil, Souza-PB	Esm. (carga tetraedral), Mont, Ct, Inters, Ilita, Fd, Qz	G-K	(Lima, 2014)
Brasil, Juazeiro-BA	Mont., Ct., Inters Esm-Ct., Qz	G-K	(Lima, 2014)
Brasil, Terra Nova-BA	Beid., Mont., Verm., Ilita, Ct., Inters, Fd, Qz	G-K, FTIR	(Lima, 2014)
Brasil, Piracicaba-SP	Beid., Ct., Inters Esm-Ct, Verm., Ilita, Ilm., Mag., Plag., Fd., Qz	G-K, FTIR	Lima, 2018
Brasil, Candiota-RS	Mont. rica em Al, Verm, Ilita, Inters, Musc., Plag., Fd, Qz	G-K, FTIR	Lima, 2018
Brasil, Santana do livramento-RS	Beid., Beid. férrica, Verm., Ilita, Ct, Inters, Pirox., Plag., Mag., Qz	G-K, FTIR	Lima, 2018
EUROPA			
Grécia	Esm. (Mont.), Verm., Ilita, Ct.		(Moustakas, 2012)
Itália, Naples	Beid, Ilita, Ct., Mica, Fd, Qz	G-K e (060)	(Righi et al., 1995)
Romênia	Esm., Ilita, Ct., Qz		(Mocanu et al., 2008)
ÁSIA			
Índia	Esm. (Nont. a Beid. férrica), Ct., Inters Esm-Ct, Plag. Calcita, Talco, Anat., Gt, Anf.	(060)	(Raja et al., 2018)
Índia	Esm. Ct., Inters Esm-Ct., Mica, Zeolitas		(Pal et al., 2009)
Índia	Esm. (Mont.), Inters Esm-Ct., Zeolitas, Fd, Qz	G-K e (060)	(BHATTACHARYYA et al., 1993)
Índia	Ct, Esm. dioctaedral, Ilita	(060)	(Barbiero et al., 2010)
Irã, Fars	Palig., Clor., Ilita, Ct, Esm.		(Heidari et al., 2008)
Irã, Lorestan	Verm., lita, Esm., Clor., Ct		(Heidari et al., 2008)
Irã, Kermanshah	Esm., Clor., Ilita, Ct		(Heidari et al., 2008)
Turquia	Nont., Ct., Clor., Mica		Guzel and Wilson, 1981
Jordânia	Esm.		(Khresat and Rawajfih, 1999)
Tailândia	Beid. rica em Fe, Ct., Verm., Ilita, Mica, Plag., Horn., Qz		(N Chittamart et al., 2010)
Indonésia	Esm., Ct, Plag., Qz		(Nurjanto et al., 2016)
ÁFRICA			
Marrocos	Esm. (Beid. e Beid. e Mont.), Ct., Ilita, Clor., Fd, Qz	G-K	(Moujahid and Bouabid, 2015)
Camarões	Esm., Ct., Ilita, Qz, Fd		(Breuer and Murad, 1992)
Camarões	Beid., Mont., Ct., Calcita, Dolomita, Biotita, Anf., Plag. Na, Fd-K, Qz	G-K	(Nguetnkam et al., 2007)
Botswana	Esm., Plag., Qz		(Ngole and Ekosse, 2008)
Quênia	Esm. dioctaedral (Beid. férrica)	G-K	(KANTOR and SCHWERTMANN, 1974)

FTIR = espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier. Esm. = esmectita, Beid. = beidelita, Fe = ferro, Mont. = montmorilonita, Ct. = Caulinita, Verm. = vermiculita, Clor. = clorita, Gt = goethita, Inters = interestratificados.

Pirox. = piroxênio, Anf. = anfibólio, Horn. = hornblenda, Plag. = plagioclásio, Fd = feldspato, Qz = quartzo, Ilm. = ilmenita, Mag. = magnetita.

2.4. Vertissolos Ebânicos

Black cracking clays, Black earths e Melanites eram alguns dos vários nomes anteriormente utilizados para designar a classe dos Vertissolos. São termos que variavam conforme a localidade remetendo à coloração escura, (Dudal and Eswaran, 1988; FAO, 2014; USDA, 1999). Os Vertissolos Ebânicos (EMBRAPA, 2013) podem ser relacionados aos correspondentes Vertisol Pellic (FAO, 2014), Vertosol Black (Sistema Australiano) e Melanic Soils (Sistema Neozelandês)(Eswaran et al., 2002), entretanto em outros sistemas a cor não é utilizada (Eswaran et al., 2002; USDA, 2014). Sua melanização está relacionada a associação entre os constituintes orgânicos e minerais esmectíticos (Dudal and Eswaran, 1988; Eswaran et al., 1999). No entanto, sua gênese e os mecanismos de estabilização da matéria orgânica (MO) são pouco compreendidos. Esses solos apresenta alto potencial para sequestrar carbono de forma eficiente (Hua et al., 2014) e, embora sua coloração seja escura, o teor de carbono orgânico normalmente não é elevado (1 a 3 dag kg⁻¹ de MOS) (Eswaran et al., 1999).

Estudos recentes têm demonstrado a capacidade de esmectitas em capturar e adsorver irreversivelmente CO₂ sob condições naturais, o qual fica retido em seus nano-espacos da entrecamada (sítios de armazenamento), bem como podem estabelecer ligações químicas com constituintes orgânicos e os estabilizar (complexos organo-mineral), além de fornecer proteção física (oclusão) à matéria orgânica a qual ficaria retida nos agregados de argila (Michels et al., 2015; Wattel-Koekkoek et al., 2001). Entretanto, a retenção, intercalação e liberação de CO₂ em esmectitas depende da natureza do cátion da entrecamada (Li⁺, Na⁺, Ni²⁺) e da temperatura, em que temperaturas acima de 35°C podem propiciar a liberação do CO₂ (Michels et al., 2015).

Em um experimento com esmectitas sintéticas observou-se que o sequestro de CO₂ por esse grupo mineral foi da ordem de 0,23 toneladas por m³ de amostra (massa/volume) (Michels et al., 2015). Dependendo da mineralogia e da composição dos constituintes orgânicos, os mecanismos de ligação para complexar a MOS são diferentes, bem como as condições óxicas e anóxicas podem afetar o tipo de interação organo-mineral (Wattel-Koekkoek et al., 2001). Em solos predominantemente esmectíticos; e cauliniticos os componentes orgânicos a eles vinculados foram apontados como pertencentes aos grupos aromáticos e polissacarídeos, respectivamente, e em comum, compostos alifáticos (Wattel-Koekkoek et al., 2001). A ligação química estabelecida entre as fases orgânicas e inorgânicas foi apenas detectada nos solos esmectíticos e se deu por pontes de cátions (Wattel-Koekkoek et al., 2001).

2.5. Vertissolos ácidos

A acidez em solos pode ser gerada via (i) dissociação do ácido carbônico proveniente da água da chuva, (ii) fluxo lateral de soluções contendo íons hidrônio (H_3O^+), (iii) hidrólise de alumínio em solução, (iv) reações de oxidação, (v) desprotonação dos sítios de fases orgânicas e inorgânicas, (vi) decomposição da matéria orgânica, (vii) processo de nitrificação, (viii) liberação de prótons durante a absorção de nutrientes pelas plantas para manutenção da neutralidade celular, (ix) aplicação de fertilizantes e outras atividades antropogênicas, (x) deposição ácida (Sposito, 2008).

A acidez é um dos principais limitantes à agricultura uma vez que causa redução da produtividade, impacta a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular. O Al é um dos elementos geradores da acidez. É o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, e sua dinâmica depende fortemente do pH (Andrén and Rydin, 2009; Ščančar and Milačič, 2006). Em valores de pH inferiores a 5,5 e superiores a 8, o Al tem sua solubilidade aumentada. Em solução, na faixa de $\text{pH} < 4,7$, predomina como espécies mononucleadas $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3^{+6}$ e, à medida que o pH aumenta, ocorre como espécies $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{+2}$ e $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})^{+2}$. Em $\text{pH} 6,5 - 8,0$ encontra-se na forma precipitada $\text{Al}(\text{OH})_3$ e acima de $\text{pH} 8$ como espécies $\text{Al}(\text{OH})^{-4}$ (Andrén and Rydin, 2009; Bi et al., 2004; Kamprath, 1970; Ščančar and Milačič, 2006).

A acidez é comum em várias classes de solos mundialmente, sendo a dinâmica do Al em solução um dos principais componentes para geração da acidez. No Brasil, existem solos simultaneamente eutróficos, ácidos, com alta CTC, argila de atividade alta, e expressivos teores de Al trocável (Wadt, 2002). A origem desse Al e os expressivos teores trocáveis têm sido investigados e creditados à superestimação desses teores em função do reagente utilizado ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) (Cunha et al., 2015, 2014). Embora, os teores de Al trocável sejam expressivos, este não parece causar fitotoxidez (Wadt, 2002), devido à atividade do Al em solução ser reduzida em função da abundância de outros cátions. Entretanto, devido à divergência de resultados e a complexidade dos fatores envolvidos mais pesquisas são necessárias.

Os Vertissolos podem ser classificados em ácidos, neutros ou alcalinos (Coulombe et al., 1996) em função do valor de pH que apresentem, entretanto os ligeiramente ácidos, neutros e alcalinos são os mais comuns (EMBRAPA, 2013). Nos Vertissolos podem ocorrer condições ácidas nos horizontes superficiais ou em todo o perfil (Coulombe et al., 1996), o que é pouco comum. Alguns trabalhos (Ahmad, 1985; Barbiéro et al., 2005; Cunha et al., 2000; Ribeiro et al., 1990) relatam tal particularidade mas, no entanto, o entendimento das causas da acidez permanecem desconhecidas. São levantadas algumas possibilidades para explicar tal característica como, a natureza ácida do material de origem, oxidação de materiais sulfídricos (pirita), decarbonatação do perfil em climas

úmidos com atuação da hidrólise (Barbiéro et al., 2005; Coulombe et al., 1996). No entanto essas possibilidades permanecem insuficientemente esclarecidas ou comprovadas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Vertissolos ácidos

3.1.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se no município de Terra Nova, Bahia (BA), região nordeste do Brasil (Figura 4). A área faz parte da Bacia sedimentar do Recôncavo Baiano, formação Recôncavo, a qual é constituída por folhelhos, argilitos e siltitos com intercalação de calcário ou cimento calcífero (Dias and Demttê, 1977). A temperatura média anual é de 24°C, a precipitação média anual de 1540 mm, a evapotranspiração média anual de 1421 mm (EMBRAPA, 1979), altitude de 86 m e relevo suave ondulado com cultivo de cana-de-açúcar. O perfil foi descrito e coletado conforme Santos et al., (2013) e classificado como VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico epirodóxico (EMBRAPA, 2013); Haplic Vertisol (Gilgaic, Grumic, Stagnic) (FAO, 2014).

Figura 4. Localização da área de estudo no município de Terra Nova-BA.

3.1.2. Análises laboratoriais

Alguns dados físicos, químicos e mineralógicos do perfil aqui apresentados foram obtidos por (Lima, 2014). Foi realizado a análise granulométrica, pH em água e KCl 1 mol L⁻¹ (1:2,5 p/v) e determinada a capacidade de troca de cátions (CTC) (Karathanasis, 2008), teor de carbono, nitrogênio e enxofre total via analisador elementar (LECO, SC-144DR) para todos os horizontes do

perfil. Adicionalmente, o índice melânico (IM) foi determinado (Shoji, 1988), assim como calculado o grau de intemperismo (CALMAG) (Nordt and Driese, 2010). A composição isotópica do carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) foi realizada no laboratório de ecologia isotópica do CENA/USP, utilizando o analisador elementar Carlo Erba modelo EA 1110, acoplado a um espectrômetro de massa com limite de detecção de 0,03%.

Para o estudo detalhado das formas de alumínio (Al), foi realizado a extração não sequencial de Al para o perfil (Tabela 2) e nos horizontes ácidos, utilizando amostras de terra fina seca ao ar (TFSA). Além das extrações com o uso de diferentes extratores químicos, foi realizado a medição dos valores de pH, da capacidade de troca de cátions (CTC) e a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) antes e após cada etapa do fracionamento. Após cada etapa do fracionamento, as amostras foram lavadas com álcool 96%, secas em estufa 105°C, maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 150 mesh, as quais foram usadas para CTC e FTIR. No fracionamento e na determinação da CTC, as análises foram realizadas em duplicata, com adição de brancos.

Tabela 2. Extração não sequencial de alumínio e formas potencialmente liberadas da fase sólida.

Frações Al	Extrator, molaridade e pH	Forma extraída e procedimento de determinação	Tempo de agitação (hr)	Sólido:solução (p:v)	Referência (s)
F1	H ₂ O; pH 4,5	Fracamente ligado, solúvel em água – EAA	0,5	10 (4g: 40 ml)	(EMBRAPA, 2009)
F2.0	0,1 mol L ⁻¹ KCl; pH 5,7	Trocável – Titulação com NaOH	0,5	10 (4g: 40 ml)	
F2.1	1 mol L ⁻¹ KCl; pH 6	Trocável – Titulação com NaOH	0,5	10 (4g: 40 ml)	(EMBRAPA, 2009; Kamprath, 1970)
F2.2	1 mol L ⁻¹ NH ₄ Cl; pH 5	Trocável – EAA	12	10 (4g: 40 ml)	(Peech et al., 1947)
F3	0,2 mol L ⁻¹ C ₂ H ₈ N ₂ O ₄ ; pH 3	Ligado a óxidos de baixa cristalinidade – EAA	4	100 (0,4g: 40 ml)	(McKeague and Day, 1966)
F4	0,5 mol L ⁻¹ CuCl ₂ ; pH 3	Ligado a fração orgânica, complexos de intermediária estabilidade – EAA	2	10 (4g: 40 ml)	(Juo and Kamprath, 1979)
F5	0,1 mol L ⁻¹ Na ₄ P ₂ O ₇ ; pH 10	Fração orgânica total – EAA	16	100 (0,4g: 40 ml)	(Bascomb, 1968)
F6	HF + HNO ₃	Total-Digestão ácida concentrada – EAA		100 (0,5g: 50 ml)	(Usepa, 1996)

EAA= espectroscopia de absorção atômica

Foi realizado ainda um segundo fracionamento químico do Al para cada horizonte ácido (Bvn₁ e Bvn₂) do Vertissolo. Nesse segundo fracionamento foi utilizado como primeiro extrator as soluções de cloreto de potássio (KCl) nas concentrações 0,1 e 1 mol L⁻¹ e cloreto de amônio (NH₄Cl) na concentração de 1 mol L⁻¹, no qual foi medida a concentração de Al, determinado o pH do extrato, e a CTC do solo. Posteriormente foi adicionado um segundo extrator (KCl 0,1 mol L⁻¹, KCl 1 mol L⁻¹, NH₄Cl 1 mol L⁻¹, Oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ e Pirofosfato de sódio 0,1 mol L⁻¹) para cada subconjunto dos primeiros extratores (KCl 0,1 mol L⁻¹, KCl 1 mol L⁻¹ e NH₄Cl 1 mol L⁻¹) e medida a

concentração de Al, o pH e determinada a CTC. Para a realização das análises estatísticas foram utilizados os valores das replicas de cada amostra para as distintas variáveis.

Para o FTIR, foi confeccionado pastilhas a partir da mistura do solo com brometo de potássio (KBr), as quais foram utilizadas para o estudo das vibrações moleculares na região espectral de 4000 - 400 cm^{-1} , sendo utilizado 0,5 mg de amostra/solo e 300 mg de KBr (secos à 100 e 200°C, respectivamente), que foram homogeneizadas e prensadas. Foi utilizado um espectrofotômetro Shimadzu IR Prestige-21. A identificação dos espectros foi realizado conforme (Chukanov, 2014; Wilson, 1994).

3.1.3. Análises estatísticas

Foi realizada a transformação nos dados brutos, log10 para as variáveis CTC, Al e a inversa para pH, visando obedecer às premissas estatísticas (normalidade [Shapiro-Wilk, S-W] e homocedasticidade). Com os dados transformados foi realizado a análise de variância multivariada (MANOVA), Post hoc (LDS), Hotelling test ($\alpha = 0,05$, nível de confiança 95%) e análise de agrupamento (Cluster). Na análise de agrupamento (Clusters) se utilizou o método vizinho mais próximo, e quanto ao vínculo entre grupo a distância euclidiana ao quadrado.

A realização dos testes estatísticos, Hotelling test e Post hoc (LDS) foram utilizados para identificar diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Enquanto a análise de cluster para verificar semelhanças entre os tratamentos, de forma a agrupa-los em classes homogêneas. Todas as análises foram realizadas utilizando o software SPSS Statistics (v.20; IBM SPSS, Chicago, IL).

3.2. Vertissolos com predomínio de caulinita na fração argila

3.2.1. Área de estudo

O perfil de Vertissolo desse estudo situa-se na região do vale do São Francisco, localizado no município de Juazeiro-BA (Figura 5). A área está inserida na Formação Caatinga, a qual é constituída de Calcários do Terciário-Quaternário (Pleistoceno). O clima da região é do tipo BSw^h (classificação de Köppen) com temperatura média anual de 26,2°C. A precipitação pluviométrica média anual é 535,8 mm, a evapotranspiração é de 2694 mm e altitude de 375 m (Azevedo et al., 2003; EMBRAPA, 1980, 1979). O perfil foi descrito e coletado conforme Santos et al. (2013) e classificado como VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico (EMBRAPA, 2013); Haplic Vertisol (Grumic) (FAO, 2014).

Figura 5. Localização da área de estudo no município de Juazeiro-BA.

3.2.2. Análises laboratoriais

Para as análises mineralógicas, amostras dos horizontes A, Bv₁ e Bv₃ do Vertissolo em estudo, foram pré-tratadas (remoção da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio 15 %, dos óxidos de ferro “livres” com uso de ditionito-citrato-bicarbonato, e eliminação de carbonatos com uso de acetato de sódio) (Jackson, 1969; Mehra and Jackson, 1960). A fração argila foi saturada com potássio (K), magnésio (Mg) e lítio (Li). A fração argila saturada com K à temperatura ambiente 25°C foi denominada de K25, e as aquecidas à diferentes temperaturas foram denominadas de K110 (110°C), K350 (350°C) e K550 (550°C). A fração argila saturada com Mg à temperatura ambiente 25°C foi denominada de Mg25 e a solvatada com glicerol MgG. A fração argila saturada com Li foi aquecida a 270°C durante 9 horas (teste de Greene-Kelly) e representa a Li270 e a solvatada com glicerol Li270G.

Na difração de raios-X, foi utilizado o equipamento Shimadzu XRD 6000, que atuou a uma tensão de 40 kV, corrente de 20 mA e radiação Cu K α , com monocromador de cristal de grafite acoplado, em ângulo de varredura de 3 a 70° 2 θ para amostras não orientadas (forma de pó), e de 3 a 35° 2 θ para as amostras orientadas. A interpretação dos difratogramas e identificação dos minerais constituintes das frações areias grossa e fina, silte e argila foi baseada no espaçamento interplanar, forma, largura, intensidade dos picos e seu comportamento aos tratamentos, de acordo com Brown and Brindley, 1980 e Moore and Reynolds, 1989.

Para o estudo dos interestratificados foi realizada a modelagem das amostras da fração argila orientada saturada com Mg e solvatadas com glicerol (MgG), utilizando-se o programa

Newmod. Os procedimentos matemáticos sobre a modelagem e os aspectos da realização da modelagem são abordados em (Deng, 2013; Moore and Reynolds, 1997).

Os parâmetros instrumentais utilizados foram comprimento de onda λ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) do anodo, raio do goniômetro (185 mm), slit divergence (0,05 mm), soller slit 1 ($6,6^\circ$), soller slit 2 (2°), comprimento da amostra (3 cm), intensidade do padrão de quartzo (30000 cps) e desvio padrão da orientação dos cristais do substrato plano, mustar (μ^* fixo de 45). Alguns dos parâmetros cristaloquímicos usados na modelagem foram, cátion ocupante da entrecamada (Mg), conteúdo de Fe octaedral, número médio e máximo de camadas por domínio coerente (N med e N máx) e espaçamento interplanar.

A modelagem foi realizada com a inserção de fases puras e/ou de fases interestratificadas de espécies minerais, de modo que o modelo simulado tenha morfologia e padrão de difratogramas o mais próximo do modelo teórico do programa Newmod.

3.3. Vertissolos Ebânicos

3.3.1. Áreas de coleta e descrição morfológica

Foram descritos, coletados e analisados quatro perfis de Vertissolos Ebânicos, provenientes dos municípios de Cachoeirinha-PE, Piracicaba-SP, Candiota (unidade de mapeamento: Aceguá)-RS e Santana do livramento (unidade de mapeamento: Escobar)-RS (Figura 6). A descrição dos perfis foi realizada de acordo com Santos et al. (2013). O material de origem e as características ambientais das áreas estão apresentadas na Tabela 3. As descrições detalhadas dos perfis, informações das áreas e da paisagem estão nos apêndices.

Tabela 3. Localização e características ambientais das áreas estudadas.

Material de origem	Clima (TMA, PMA, ETMA, A)	Relevo local	Vegetação atual
(P1) Cachoeirinha-PE			
Anfibolito quartzo sienito	21°, 551 mm, 1100 mm, 536 m	P	Cactáceas
(P2) Piracicaba-SP			
Diabásio	22°, 1293 mm, 1535 mm, 496 m	P	Pastagem (Gramíneas)
(P3) Aceguá-RS			
Argilito/Folhelho calcífero	17,7°, 1300 mm, 1270, 189 m	SO	Vegetação natural (Gramíneas)
(P4) Escobar-RS			
Basalto	19,6°, 1492 mm, 1342 mm, 261 m	P	Vegetação natural (Gramíneas)

TMA= temperatura média anual; PMA= precipitação média anual; ETMA= evapotranspiração média anual; A= altitude. P= plano; SO= suave ondulado.

Figura 6. Localização das áreas de estudo nos municípios de Cachoeirinha-PE, Piracicaba-SP, Santana do Livramento-RS e Candiota-RS.

3.3.2. Análises físicas, químicas e mineralógicas

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Donagemma et al., 2017), com uso de hexametáfosfato de sódio (50 g L^{-1}) como dispersante (Gee and Or, 2002) e feita a remoção da matéria orgânica com uso de peróxido de hidrogênio 30% (Lavkulich and Wien, 1970). A argila dispersa em água (ADA) foi determinada pelo método da pipeta, porém sem uso de dispersante químico (Donagemma et al., 2017). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico com uso de álcool etílico (Donagemma et al., 2017). O coeficiente de extensibilidade linear (COLE) foi realizado por um método alternativo e validado pelo COLE standard. O valor do COLEalt foi calculado pela equação: $\text{COLEalt} = ((\text{Dseca}/\text{Dúmida})^{(1/3)}) - 1$. Foi estimado o grau de floculação (GF) pela fórmula: $\text{GF} = [(\% \text{ Argila Total} - \% \text{ ADA})/\% \text{ Argila Total}] \times 100$.

As análises químicas realizadas foram, pH em água e em KCl 1 mol L^{-1} suspensão solo:água/solução (1:2,5; peso:volume). Extração de K^+ e Na^+ com solução de Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) e determinação em fotômetro de chama. Extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} com KCl 1 mol L^{-1} e determinação por espectroscopia de absorção atômica e titulação (Al^{3+}). A acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) foi extraída com acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 e determinação por titulometria (EMBRAPA, 2009). O fósforo (P) disponível foi extraído pela solução Mehlich-1 e determinado por colorimetria. A partir dos resultados, foram calculados a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%).

Para as análises mineralógicas, foram realizados os pré-tratamentos de remoção da matéria orgânica com hipoclorito de sódio (Lavkulich and Wien, 1970) e remoção de óxidos de ferro “livres” (Mehra and Jackson, 1960). A separação das frações argila e silte foi realizada por centrifugação e a fração areia obtida por peneiramento úmido. As amostras foram maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 150 mesh, foram confeccionadas lâminas orientadas para a fração argila e não orientadas (pó) para as frações areia, silte, e Cr e/ou rocha.

Os minerais foram identificados por difratometria de raios-X (DRX). As amostras da fração argila foram saturadas com potássio (K^+) a temperatura ambiente 25°C (K25), aquecidas a 110°C (K110), 350°C (K350) e 550°C (K550). Foram realizadas as saturações com magnésio (Mg) e lítio (Li), solvatação desses cátions com glicerol (Mg^{2+} , Li^+) e aquecimento à 270°C durante 9 horas (Li).

A distinção entre espécies de esmectita e a natureza da carga da camada foi realizada pelo teste de Greene-Kelly (Greene Kelly, 1953) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). A beidelita/nontronita expande após ter sido saturada com Li, aquecida à 270°C durante 9 horas e solvatada com glicerol (Li270G), enquanto a montmorilonita colapsa em 1.00 nm (Li270G), devido a migração dos íons de Li da entrecamada para as cavidades hexagonais e posteriormente aos sítios octaédrais (Bodart et al., 2018).

Na difração de raios-X, foi usado o equipamento Philips PW 1877, operado em potencial de 40 kV, corrente de 40 mA e radiação Cu-K α , com monocromador de grafite acoplado (eliminar radiação K β). A amplitude de varredura para amostras na forma de pó (não orientadas) foi de 3 a 90° 2 θ , e de 3 a 65° 2 θ para as amostras orientadas, saturadas, solvatadas com glicol e aquecidas. A varredura foi realizada com passo de 0,02 °2 θ e tempo de acumulação de 1 segundo por passo. A interpretação dos difratogramas e identificação dos minerais foi baseado no espaçamento interplanar, forma, largura, intensidade dos picos e seu comportamento nos tratamentos, de acordo com (Brown and Brindley, 1980), (Moore and Reynolds, 1989) e software X’Pert HighScore Plus.

Foi realizado a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para distinção de espécies minerais do grupo esmectita com natureza de carga na camada tetraedral. Para isso, foram confeccionados pastilhas a partir da mistura de amostras da fração argila desferrificada (1 mg) com brometo de potássio (KBr, 299 mg) para o estudo das vibrações moleculares na região espectral de 4000 - 400 cm^{-1} . Nessa análise foi utilizado um espectrofotômetro Shimadzu IR Prestige-21. A identificação dos espectros foi realizado conforme (Chukanov, 2014; Wilson, 1994).

3.3.3. Teores totais de carbono (C), nitrogênio (N) e enxofre (S), índice melânico (IM), composição isotópica de carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) e ressonância magnética nuclear de carbono 13 (RMN ^{13}C)

Os teores de carbono e nitrogênio totais foram obtidos por oxidação seca, utilizando o analisador elementar LECO CN 2000. Foi determinado o índice melânico (Shoji, 1988), o qual informa se há predominância da fração ácido fúlvico ou da fração ácido húmico e pode indicar o grau de humificação da MOS. Foi realizado o fracionamento químico das substâncias húmicas (SH), o qual se baseia na solubilidade das mesmas em meios alcalino e ácido, de modo a obter as frações ácidos fúlvico (FAF), ácidos húmico (FAH) e humina (FH). A quantificação do carbono, nitrogênio e enxofre foi realizada utilizando-se o analisador elementar LECO CN 2000 e LECO SC-144DR.

A composição isotópica do carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) foi realizada no laboratório de ecologia isotópica do CENA/USP, utilizando o analisador elementar Carlo Erba modelo EA 1110, acoplado a um espectrômetro de massa com limite de detecção de 0,03%.

Foi realizada a ressonância magnética nuclear de carbono 13 (^{13}C) (RMN de ^{13}C) para identificar os grupos funcionais que compõem as substâncias húmicas (SH) dos solos, especificamente da fração ácido húmico, no CACTUS (USC, Espanha).

Amostras sólidas foram submetidas a RMN ^{13}C , as quais foram analisadas no espectrofotômetro Varian Inova-750 equipado com uma sonda sólida T3 (operando a uma frequência de ressonância do próton de 750 MHz e usando rotor de zircônio de diâmetro externo de 3,2 mm). Os sinais químicos do carbono foram padronizados em relação ao sinal do carbono metileno do sólido adamantane a 28,92 ppm. A polarização cruzada do ângulo mágico spinning do carbono treze (^{13}C) (1D ^{13}C CPMAS) foi calibrada com uma amostra de glicina. Os sinais químicos dos prótons foram padronizados em relação ao sinal do adamantane a 1,87 ppm. O espectro das amostras (1D ^{13}C CPMAS) foi realizado com tempo de contato de 1ms. Durante a polarização cruzada, a força do campo dos pulsos de carbono foram constantes a 49,7 kHz, e o pulso do ^1H a 51kHz em uma rampa linear. O atraso do relaxamento entre varreduras foi de 0,5 s e a taxa MAS de 15 kHz. O desacoplamento heteronuclear durante a aquisição do FID foi realizado com SPINAL-64 com força do campo de prótons de 108,6 kHz. O número de varreduras foram 240000 e o tempo de medição total do espectro de 33 hr.

Foi realizado o fracionamento químico e purificação das substâncias húmicas (SH) antes de submete-las a RMN. O cálculo realizado para as amostras foi baseado nas seguintes proporções durante o fracionamento das SH (especificamente para obtenção da fração ácido húmico). Para relação solo:solução (1:10), foi utilizado 75/100g de solo para 1 L de NaOH 0,1 mol L⁻¹, 0,5 L de água ultrapura e 25 mL de NaOH 1 mol L⁻¹. O material foi agitado por um dia e deixado em repouso por um

dia (24 hr). Passado o período, o material foi centrifugado a 2000 rpm durante 20 minutos. A fração sólida que representa a fração humina foi desmineralizada com HCl 0,1 mol L⁻¹ + HF 0,3 mol L⁻¹ e posteriormente com HF 10%, adicionada em membrana de diálise, congelada e liofilizada (Gonçalves et al., 2003; Swift, 1996).

À fração líquida (sobrenadante) foram adicionados 30 mL de HCl 6 mol L⁻¹ (pH cerca de 1), e o material foi deixado em repouso por 16 hr, sendo depois centrifugado a 2000 rpm durante 20 minutos. A fração sólida foi redissolvida com 1 L de KOH 0,1 mol L⁻¹ sob atmosfera de N₂, foram adicionado 15 gramas de KCl e o material foi centrifugado (2000 rpm, 20 min.). A partir da fração sólida redissolvida, foi adicionado HCl 6 mol L⁻¹ (pH cerca de 1) e centrifugado (2000 rpm, 20 min). Na fração sólida foi adicionada uma mistura de HCl 0,1 mol L⁻¹ + HF 0,3 mol L⁻¹ (1L da mistura de ácidos para cada 500 mL de sólido obtido), e posteriormente o material foi agitado durante 16 hr. Esse processo foi repetido quando se observou cinzas no sobrenadante (Swift, 1996).

Esse material foi colocado em membrana de diálise, tendo sido trocada a água da bandeja contendo a membrana até que todos os cloretos fossem eliminados. Depois o material foi congelado e liofilizado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Vertissolos ácidos

O Vertissolo Háptico ácido da região de Terra Nova-BA, apresentou coloração variegada (Tabela 4) com presença de mosqueados nos horizontes B, os quais foram observados em campo e visualizado feições redoximórficas nas lâminas da micromorfologia (Figura 12). Sua consistência dura a extremamente dura e muito plástica e muito pegajosa condiz com sua textura argilosa a muito argilosa (Tabelas 4 e 5), bem como com sua assembleia mineralógica constituída por espécies esmectíticas, fases minerais interestratificadas e caulinita (Figura 8). Em superfície (Hz A) apresentou estrutura mista constituída por granular e blocos subangulares pequenos a médios com grau de desenvolvimento moderado, enquanto que em subsuperfície estrutura prismática que se desfaz em blocos angulares com grau de desenvolvimento moderado (Tabela 4). A presença de slickensides moderados e comuns a partir do horizonte B indicam processo de contração e expansão ativo, o qual foi alto de acordo com os valores de COLEstd (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Atributos morfológicos do Vertissolo Háptico de Terra Nova-BA.

Horizontes	Prof. cm	Cor úmida	Classe textural	Estrutura	Consistência			F, S	T
					Seca	Úmida	Molhada		
Ap	0-16	10YR 4/2	arg	mod peq méd gran, mod peq méd bl sub	d	fri	mt plas, mt peg	F	cla, pla
ABv	16-26	10YR 4/2	mt arg	mod gra mt gra prism	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F	cla, pla
Bvn ₁	26-53	7,5YR 5/8, 10YR 5/6, 5Y 6/3	mt arg	mod gra mt gra prism, mod méd gra bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	cla, pla
Bvn ₂	53-71	10YR 5/6, 5Y 6/2	mt arg	fra mt gra prism	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	grad, pla
Cvn	71-100cm+	5Y 6/2, 5Y 6/8	mt arg	maç	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	-

(Lima, 2014)

Classe textural: arg = argila, mt arg = muito argilosa.

Estrutura: grau, fra = fraca, mod = moderada, fo = forte; tamanho, mt peq = muito pequena, peq = pequena, méd = média, gra = grande, mt gra = muito grande; tipo, gran = granular, bl ang = blocos angulares, bl sub = blocos subangulares, prism = prismática, maç = maciça.

Consistência: seca, d = dura, mt d = muito dura, ext d = extremamente dura; úmida, fri = friável, f = firme, mt f = muito firme; molhada, plasticidade: mt plas = muito plástica, pegajosidade: mt peg = muito pegajosa.

F = fendas, S = slickensides.

T = Transição: cla = clara, grad = gradual, dif = difusa, pla = plana.

O Vertissolo apresentou valores de pH em água variando de 4,53 a 7,20, redução de carbono em profundidade, predomínio de cálcio no complexo de troca em relação aos demais cátions (magnésio, sódio e potássio), percentagem de saturação por sódio (PST) relativamente alta nos últimos dois horizontes e baixos teores de fósforo disponível (Tabela 6). A saturação por bases (V%) superior a cinquenta por cento caracteriza esse solo como eutrófico (Tabela 6).

Tabela 5. Atributos físicos do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA.

Horizontes	Prof. cm	AG	AF	Silte g kg ⁻¹	Argila	ADA	GF -- % --	Dp	Ds ₃₃ g cm ⁻³	Ds ₁₀₅	P ₃₃ ----- % -----	P ₁₀₅	COLE std cm cm ⁻¹	S.E m ² g ⁻¹
Ap	0-16	159	114	199	528	323	39	2,67	1,28	1,61	52	39	0,09	122
ABv	16-26	57	56	239	648	359	45	2,76	1,18	1,82	57	34	0,14	-
Bvn ₁	26-53	5	6	224	765	350	54	2,85	1,07	1,77	62	38	0,18	139
Bvn ₂	53-71	3	6	222	769	128	83	2,83	1,09	1,84	62	35	0,19	-
Cvn	71-100cm+	4	7	170	819	304	63	2,87	1,10	1,83	62	36	0,19	140

(Lima, 2014)

Prof. = profundidade, AG = areia grossa (2-0.21 mm), AF = areia fina (0.21-0.053 mm), Silte (0.053-0.002 mm), Argila (<0.002 mm), GF = grau de flocculação, Dp = densidade de partículas, Ds₃₃ = densidade do solo à 33 kpa, Ds₁₀₅ = densidade do solo à 105°C, P₃₃ = Porosidade do solo à 33 kpa, P₁₀₅ = porosidade do solo à 105°C, COLEstd = coeficiente de extensibilidade linear padrão, S.E = superfície específica.

Tabela 6. Atributos químicos do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA.

Horizontes	Prof. cm	pH (1:2,5)		COT	Eq. CaCO ₃ ----- g kg ⁻¹ -----	Complexo sortivo (cmolc kg ⁻¹)								V	PST	P
		Água	KCl			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SB	Al ³⁺	H+Al	CTC	-----%-----		mg kg ⁻¹
Ap	0-16	5,43	4,50	13,24	3,75	14,95	8,86	0,42	0,58	24,81	0,05	6,60	31,41	79	1,69	2,55
ABv	16-26	5,59	4,55	12,33	4,38	18,39	11,03	0,70	0,29	30,41	0,10	6,98	37,39	81	2,30	0,57
Bvn ₁	26-53	4,53	3,65	8,32	4,00	18,57	12,58	2,07	0,31	33,53	7,73	18,67	52,20	64	6,17	0,43
Bvn ₂	53-71	4,60	3,71	5,21	4,25	23,18	16,35	3,45	0,42	43,40	3,35	11,19	54,59	79	7,95	0,32
Cvn	71-100cm+	7,20	6,25	4,67	5,31	25,18	21,96	4,54	0,23	51,91	0	1,68	53,59	97	8,75	28,48

(Lima, 2014)

Prof.: Profundidade; pH: Potencial hidrogeniônico em água e cloreto de potássio (KCl); COT: Carbono orgânico total; Eq. CaCO₃= Equivalente de carbonato de cálcio; Cátions trocáveis: Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Sódio (Na⁺), Potássio (K⁺); SB: Soma de bases (Ca+Mg+Na+K); Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Percentagem de saturação por bases (SB/CTC)*100; PST: Percentagem de saturação por sódio (Na/CTC)*100; P: Fósforo disponível.

4.1.1. Fracionamento químico do alumínio (Al) e atributos físicos e químicos do perfil

Em relação ao comportamento do Al no perfil, os teores de Al variaram em profundidade e para os diferentes extratores (Tabela 7). De forma geral, os teores de Al (mg kg^{-1}) em ordem decrescente foram: Al total, proveniente da matriz mineral inorgânica (Al_Total, F6); Al extraído com pirofosfato de sódio (Al_PS, F5), que se refere ao Al ligado à formas orgânicas; Al extraído com oxalato de amônio (Al_OA, F3), que corresponde ao Al proveniente de fases de baixa cristalinidade; Al trocável, ou seja, o Al adsorvido via complexos de esfera externa aos sítios de troca do solo, e o Al livre ou solúvel em água (Al_Água, F1)(Tabela 7).

Tabela 7. Fracionamento químico de alumínio do perfil do Vertissolo Háplico, Terra Nova-BA.

Horizontes/Nº amostra		Ap/(36)	ABv/(37)	Bvn ₁ /(38)	Bvn ₂ /(39)	Cvn/(40)
Al_Água	mg kg^{-1}	181,50	220,77	9,64	12,71	16,86
Al_KCl_0,1	mg kg^{-1}	2,00	2,50	140,50	59,50	0,00
Al_KCl_1	mg kg^{-1}	3,00	3,00	619,50	230,00	0,00
Al_NH ₄ Cl_1	mg kg^{-1}	9,21	13,32	773,25	259,99	6,44
Al_OA	mg kg^{-1}	1534,89	2286,38	2884,35	2184,53	1589,70
Al_CuCl ₂	mg kg^{-1}	119,36	147,84	483,34	232,10	135,52
Al_PCu	mg kg^{-1}	6926,14	12058,41	20983,91	18263,65	1160,18
Al_PS	mg kg^{-1}	7045,50	12206,50	21467,50	18496,00	1295,50
Al_Total	mg kg^{-1}	30352,50	23512,50	40365,50	33772,50	32414,00
pH_Água (extrato)		6,81	6,91	4,94	4,89	7,40
pH_KCl_0,1 (extrato)		5,18	5,14	3,87	4,09	6,80
pH_KCl_1 (extrato)		4,93	4,97	3,89	3,97	6,60
pH_NH ₄ Cl_1 (extrato)		4,84	4,92	3,77	3,86	6,68
pH_OA (extrato)		2,97	2,95	2,92	2,90	2,90
pH_CuCl ₂ (extrato)		2,97	3,21	3,16	3,13	3,11
pH_PS (extrato)		9,86	9,95	9,86	9,91	10,00
CTC (solo)	mmolc kg^{-1}	318	397	455	479	504

Al_Água = teor de Al extraído em água deionizada; Al_KCl_0,1 = teor de Al extraído pela solução de cloreto de potássio na concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$; Al_KCl_1 = teor de Al extraído pela solução de cloreto de potássio na concentração de 1 mol L^{-1} ; Al_NH₄Cl_1 = teor de Al extraído pela solução de cloreto de amônio na concentração de 1 mol L^{-1} ; Al_OA = teor de Al extraído pela solução de oxalato de amônio na concentração de $0,2 \text{ mol L}^{-1}$; Al_CuCl₂ = teor de Al extraído pela solução de cloreto de cobre na concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$; Al_PCu = teor de Al obtido pela subtração matemática de Al_PS menos Al_CuCl₂; Al_PS = teor de Al extraído pela solução de pirofosfato de sódio na concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$; Al_Total = teor de Al obtido na digestão concentrada ácida; CTC = capacidade de troca de cátions; (n= 80, 8x5x2).

O fracionamento do Al complexado à fração orgânica mostrou que houve maior conteúdo de Al ligado a complexos de alta estabilidade (Al_PCu) em relação ao Al ligado a complexos de intermediária estabilidade (Al_CuCl₂, F4) (Tabela 7).

Dentre a fração trocável, a solução de NH₄Cl_1 extraiu Al da F3, o que de fato foi verificado no horizonte Cvn, enquanto que as soluções de KCl não extraíram Al dessa fração (Tabela 7).

Teoricamente, a solução de PS, além de extrair o Al ligado a fases orgânicas, extrairia o Al da F1, F2, algo da F3 e F6. Matematicamente, fazendo a subtração do Al contido nessas frações, o teor de Al extraído com PS continua alto, exceto para o horizonte Cvn, a qual condiz com o menor de carbono total (Tabelas 7, 6). Que apoia a adsorção do Al aos sítios orgânicos.

A capacidade de troca de cátions do solo (CTC_solo) aumentou em profundidade e teve relação direta e positiva com o teor de argila e inversa com o teor de carbono total (Tabelas 5,6,7). Esse comportamento é comum em Vertissolos e creditado, principalmente, ao teor de argila e predomínio de fases esmectíticas na fração argila (Moustakas, 2012; Pal et al., 2009).

Embora o teor de carbono total tenha permanecido entre 13,76 e 4,40 g/kg, ele foi importante na adsorção de Al, correspondendo a um compartimento de estoque de Al, como observado pela distribuição das frações (Tabela 7). A natureza desse carbono está mais relacionada aos ácidos fúlvicos que húmicos conforme indicam os resultados do índice melânico (Tabela 8). Os ácidos fúlvicos têm solubilidade tanto em meio alcalino quanto em meio ácido (Benites et al., 2003). Dessa forma, no pH vigente do solo, os ácidos fúlvicos provenientes dos horizontes superficiais, podem estar contribuindo para liberação de Al, e abastecendo à fase trocável possibilitando a manutenção da acidez em subsuperfície. Os teores de enxofre total são muito baixos (Tabela 8), o que descarta uma possível contribuição de materiais sulfídricos para geração da acidez.

A partir da relação entre o pH do extrato e o teor de Al, verifica-se que a presença de Al é absoluta e ocorre em todo o perfil. Indicando distintos compartimentos de Al, desde o Al de menor disponibilidade (Al estrutural da matriz mineral inorgânica), potencialmente disponível (Al_PS, Al_OA), trocável (Al_KCl, Al_NH₄Cl) até o fracamente adsorvido (Al_H₂O) (Tabela 7). Para cada fração o Al ocorre como espécies distintas, mas pode ocorrer como mais de uma espécie simultaneamente, o que implica numa dinâmica e interconexão entre as frações, as quais promovem o retroabastecimento do Al e da acidez no Vertissolo.

Tabela 8. Atributos químicos do perfil do Vertissolo Háplico, Terra Nova-BA.

Horizontes/Nº amostra		Ap/(36)	ABv/(37)	Bvn ₁ /(38)	Bvn ₂ /(39)	Cvn/(40)
Enxofre total (solo)	g kg ⁻¹	0,22	---	0,25	---	0,08
Relação C/N		8,22	6,80	4,72	4,00	3,19
		-19,03	-19,63	-24,41	-24,25	
Tipo de vegetação	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	C4 e C3	C4 e C3	C3	C3	---
Índice melânico (IM)	Fúlvico	2,26	---	2,14	---	---
CALMAG	%	25,3	---	28,7	---	21,1
CTC (argila desferificada)	mmolc kg ⁻¹	381	---	431	---	406
Al ₂ O _{3OA} (solo)	dag kg ⁻¹	0,34	---	0,65	---	0,34
Al ₂ O _{3DCB} (solo)	dag kg ⁻¹	0,86	---	1,20	---	0,85
Fe ₂ O _{3OA} (solo)	dag kg ⁻¹	0,72	---	0,69	---	0,24
Fe ₂ O _{3DCB} (solo)	dag kg ⁻¹	5,13	---	6,04	---	4,83

C/N = relação carbono/nitrogênio; Índice de intemperismo: CALMAG = $\{Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+MgO)\} \cdot 100$; CTC = capacidade de troca de cátions; desf. = desferificada; Al₂O_{3OA} = teor de óxido de Al de baixa cristalinidade (extraído com a solução de oxalato de amônio); Al₂O_{3DCB} = teor de óxido de Al "livres" (extraído com a solução de ditionito-citrato-bicarbonato); Fe₂O_{3OA} = teor de óxido de Fe de baixa cristalinidade (extraído com a solução de oxalato de amônio); Fe₂O_{3DCB} = teor de óxido de Fe "livres" (extraído com a solução de ditionito-citrato-bicarbonato).

Tabela 9. Assembleia mineralógica do Vertissolo Háplico, Terra Nova-BA.

	Areia grossa e fina	Silte	Argila
(36) Ap	Qz, Fd	Qz, Fd, Kt	Ilita, Kt, Beidelita, Mont, Interest
(38) Bvn1	Qz	Mica, Kt, Qz, Fd	Ilita, Kt, Beidelita, Mont, Interest
(40) Cvn	Qz	Mica, Kt, Qz, Fd	Ilita, Kt, Verm., Beidelita, Mont, Ct, Interest
Material origem	Esm, Mica (Muscovita) Calcita, Qz		

(Lima, 2014) e FTIR

Qz=quartzo, Fd=feldspato, Kt ou Ct =caulinita, Verm= vermiculita, Sm ou Esm = esmectita, Mont=montmorilonita, Interest.=interestratificados, FTIR = espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.

Figura 7. Mineralogia das frações areia (a) e silte (b) do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA. FS = areia fina, CS = areia grossa. Qz = quartzo, Fd = feldspato. A, Bvn1 e Cvn são os horizontes.

Observando os picos da fração argila dos DRX nos tratamentos com K (K25) e K aquecido (K110, 350 e 550) não se encontra VHE/EHE (Figura 8). A abertura dos picos foi devido a presença de interestratificados (dados não apresentados).

Figura 8. Mineralogia da fração argila dos horizontes Ap (a), Bvn1 (b) e Cvn (c) do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BR, e seus respectivos tratamentos. B/N = beidelita/nonttronita; Mont = montmorilonita; Sm = esmectita; Verm = vermiculita; Kt = caulinita; Qz = quartzo.

Figura 9. Mineralogia do material de origem do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA.
Sm =esmectita; Qz = quartzo.

4.1.2. Fracionamento químico do Al para os horizontes ácidos

Após a extração não sequencial do alumínio (ENS_Al) para os horizontes ácidos (Bvn₁ e Bvn₂) representados pelas amostras (38 e 39), se verificou que os teores médios de Al (mg kg⁻¹) em ordem decrescente foram: Al_PS (19981,75), Al_OA (2534,44), Al_NH₄Cl_1 (516,62), Al_KCl_1 (424,75), Al_KCl_0,1 (100,00) e Al_Água (11,18), enquanto os valores médios de CTC (mmolc kg⁻¹) em ordem decrescente foram CTC_PS (492,27), CTC_TFSA (467,41), CTC_NH₄Cl_1 (445,63), CTC_OA (430,68), CTC_KCl_0,1 (428,07) e CTC_KCl_1 (398,72) (Tabela 10). Os valores médios foram calculados a partir dos valores das replicas obtidas para cada amostra.

Em relação ao solo, representado por TFSA, quando houve extração com PS ocorreu aumento da CTC (Tabela 10), ou seja, aumento do número de sítios negativos. O aumento da CTC pode ser creditado à transformação de illita para vermiculita, via perda de potássio (K⁺) da entrecamada, pois a matriz mineral inorgânica desse solo apresenta illita na fração argila (Figura 8), e este mineral após perder K⁺ desbloqueia sítios negativos (Fanning et al., 1989). Esse resultado é corroborado, pois o extrator PS não foi seletivo para a fração do Al ligado aos compostos orgânicos (Tabela 7).

Houve relação inversa e negativa entre teor de carbono e Al_PS em profundidade (Tabelas 6,7), ou seja, mesmo havendo decréscimo do teor de carbono em profundidade os teores de Al_PS aumentaram, indicando dissolução de fases minerais inorgânicas (filossicatos 2:1). Subtraindo-se o teor de Al das outras frações (Al_H₂O + Al_Trocável + Al_OA), e considerando que o PS extraísse 20% do Al_inorgânico mineral, o teor de Al ligado a compostos orgânicos ainda manteve-se alto, e superior ao somatório do Al das frações (Al_H₂O, Al_Trocável e Al_OA), validando tal achado. Diferentes autores verificaram que a solução de PS não foi seletiva para fração orgânica, pois dissolve

compostos de outras frações, entre elas a fração mineral inorgânica (Almeida et al., 2010; Cunha et al., 2015).

Tabela 10. Valores médios da CTC, formas de Al e pH de horizontes ácidos do Vertissolo Háplico, Terra Nova-BA.

	CTC mmolc kg ⁻¹	Diferença entre CTC	Al mg kg ⁻¹	pH extrato
TFSA	467,41		11,18	4,91
KCl_0,1	428,07	-8,4%	100,00	3,63
KCl_1	398,72	-14,7%	424,75	3,90
NH ₄ Cl	445,63	-4,7%	516,62	3,81
OA	430,68	-7,9%	2534,44	2,91
PS	492,27	+5,3%	19981,75	9,88

TFSA = representa o solo natural, sem tratamento (terra fina seca ao ar); KCl_0,1 = tratamento com a solução de cloreto de potássio na concentração de 0,1 mol L⁻¹; KCl_1 = tratamento com a solução de cloreto de potássio na concentração de 1 mol L⁻¹; NH₄Cl = tratamento com a solução de cloreto de amônio na concentração de 1 mol L⁻¹; OA = tratamento com a solução de oxalo de amônio na concentração de 0,2 mol L⁻¹; PS = tratamento com a solução de pirofosfato de sódio na concentração de 0,1 mol L⁻¹; CTC = capacidade de troca de cátions; Diferença entre CTC = expressa a redução ou aumento da CTC dos tratamentos em relação a TFSA; Al = teor de alumínio; pH = potencial hidrogeniônico; (n=24, 6x2x2).

Indicando que a fração do Al ligado a compostos orgânicos (F5) expressa por Al_PS, que representa o Al ligado a compostos orgânicos correspondeu a uma importante fração na dinâmica do Al. Além de apontar uma debilidade das fases minerais inorgânicas (principalmente filossilicatos 2:1) bem como sua susceptibilidade a alteração nas condições atuais, corroborando com a formação de interestratificados.

Após a extração com os demais extratores, ocorreu redução da CTC, ou seja, diminuição do número de sítios negativos (Tabela 10). No caso dos extratores NH₄Cl/OA em relação ao KCl_0,1/KCl_1, a redução da CTC foi menos acentuada (-4,7 e -7,9% vs -8,4% e -14,7%, Tabela 10) fato que provavelmente indica a ilitização via fixação de íons de NH₄⁺ (Figura 10B). De fato, a espectroscopia de Infravermelho evidenciou bandas existentes em 3260/3166 e 1400/1430 cm⁻¹ que são indicativas da presença de NH₄⁺ (Aouada et al., 2008; Chukanov, 2014; Wilson, 1994). No caso do KCl_0,1/KCl_1 além da redução da CTC, houve uma provável ilitização via fixação de íons de K⁺. A ilitização pode ocorrer quando a matriz mineral é composta por micas, ilitas, vermiculitas com alta carga na camada e/ou intemperizadas, as quais podem fixar íons de K⁺ ou NH₄⁺ (Fanning et al., 1989), em função da similaridade de raio iônico e valência desses íons (Scherer et al., 2014).

Figura 10. A-) FTIR do material de origem (PM) e da fração argila dos horizontes do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA; B-) FTIR dos tratamentos do fracionamento químico do alumínio do Vertissolo Háplico de Terra Nova-BA.

Após a análise de agrupamento pôde-se organizar os diferentes extratores em função de cada variável (Figuras 11A, 11B, 11C) da seguinte maneira: (i) para a variável CTC pode-se agrupar em PS $\neq$ KCl_0,1/KCl_1 $\neq$ OA/NH₄Cl/TFSA (ponto de corte 8), (ii) para a variável pH, PS $\neq$ OA $\neq$ KCl_0,1/KCl_1/NH₄Cl/TFSA (ponto de corte 8) e para a variável Al (iii) em PS $\neq$ TFSA $\neq$ OA/NH₄Cl/KCl_0,1/KCl_1 (ponto de corte 14). O valor do ponto de corte foi baseado de modo a agrupar observações com similaridade comum e assim obter grupos homogêneos.

Figura 11. A-) Dendrogramas para as variáveis CTC (a), pH (b) e Al (c); 24 acessos, em que 1-4 representa TFSA; 5-8 representa KCl_0,1; 9-12 representa KCl_1; 13-16 representa NH₄Cl; 17-20 representa OA; 21-24 representa PS.

Para a variável CTC, agrupou-se os extratores em três grupos, o que aumentou a CTC (PS) e os que promoveram redução da CTC. No NH₄Cl/OA a redução da CTC foi menos acentuada e houve fixação de íons NH₄⁺ (Tabela 10 e Figura 10B), enquanto que no KCl_0,1/KCl_1 foi mais acentuada e com fixação de íons K⁺ (Tabela 10). Para a variável Al houve classificação em três grupos, PS com teores de Al superiores aos da TFSA, e OA/NH₄Cl/KCl_0,1/KCl_1 inferiores ao da TFSA (Figura 11C).

Com o objetivo verificar diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para as distintas variáveis foi aplicado o teste de Hotelling (Tabela 11). Verificou-se que os teores de Al e pH diferiram para todos os tratamentos (diferentes extratores), exceto para o tratamento KCl_1 vs NH₄Cl_1 (Tabela 11). Esses extratores computam a fração do Al trocável, que representa o Al adsorvido via complexos de esfera externa com os sítios negativos do solo. Embora o NH₄Cl_1 tenha extraído teores maiores de Al que o KCl_1, essa diferença não foi estatisticamente significativa (Tabelas 7, 10, 11). Resultado similar foi obtido por (Shuman and Duncan, 1990).

Embora os teores de Al e pH não diferiram estatisticamente para fração trocável, houve diferença estatística para CTC, o que confirma que mesmo retirando teores de Al similares em valores de pH próximos houve diferença da CTC, indicando que a dinâmica iônica (K⁺ vs NH₄⁺) influencia na redução da CTC, e que a diminuição da CTC foi maior quando extraída com KCl_1. Esses resultados apoiam os anteriores em que ambos extratores promovem ilitização na matriz mineral, e que a ilitização e redução da CTC mas acentuada com KCl foi devido ao efeito do íon comum.

A fase sólida (matriz mineral contendo K⁺) em contato com a solução concentrada (KCl 1 mol L⁻¹) tem sua solubilidade reduzida, devido a concentração de K⁺ na solução ser alta o que favorece a manutenção da estrutura cristalina bem como a fixação de íons de K⁺ na fase sólida mineral, em função da afinidade mineral com o elemento químico (K⁺) com difusão e posterior fixação de íons de K⁺ na matriz mineral em função do gradiente químico gerado.

Tabela 11. Testes estatísticos multivariados (Hotelling test e LDS).

Tratamentos	Hotelling's T -squared distribution (T^2)			LDS
	CTC.mmolckg ⁻¹⁽¹⁾	pH.extrato ⁽²⁾	Al.mgkg ⁻¹⁽³⁾	⁽¹⁾
TFSA vs KCl 0,1		*	*	
TFSA vs KCl 1	*	*	*	*
TFSA vs NH ₄ Cl		*	*	
TFSA vs OA	*	*	*	
TFSA vs PS		*	*	
KCl 0,1 vs KCl 1		*	*	
KCl 0,1 vs NH ₄ Cl		*	*	
KCl 0,1 vs OA		*	*	
KCl 0,1 vs PS		*	*	*
KCl 1 vs NH ₄ Cl	*			*
KCl 1 vs OA	*	*	*	
KCl 1 vs PS	*	*	*	*
NH ₄ Cl vs OA		*	*	
NH ₄ Cl vs PS		*	*	*
OA vs PS		*	*	*

(*) $\alpha < 0.05$; Os resultados da análise estatística para as variáveis pH e Al do LSD foi igual ao do Hotelling test. TFSA = representa o solo natural, sem tratamento (terra fina seca ao ar); KCl_0,1 = tratamento com a solução de cloreto de potássio na concentração de 0,1 mol L⁻¹; KCl_1 = tratamento com a solução de cloreto de potássio na concentração de 1 mol L⁻¹; NH₄Cl = tratamento com a solução de cloreto de amônio na concentração de 1 mol L⁻¹; OA = tratamento com a solução de oxalo de amônio na concentração de 0,2 mol L⁻¹; PS = tratamento com a solução de pirofosfato de sódio na concentração de 0,1 mol L⁻¹; O vs indica o "contraste" entre os tratamentos.

4.1.3. Segundo fracionamento químico do Al para os horizontes ácidos

Verificou-se que a solução de KCl_1 mesmo apresentando alta concentração salina não dissolveu compostos de baixa cristalinidade, nem superestimou as formas trocáveis de Al, resultados contrários aos obtidos por (Cunha et al., 2014). Além disso, a solução de KCl_0,1 não foi adequada para estimar o Al trocável, conforme sugerido por Cunha et al., (2014), pois os teores obtidos foram baixos (Tabelas 10, 11).

Após a 2ª extração com KCl_1 (KCl1_KCl_1), mesmo havendo decréscimo no valor de pH não foi detectado Al em solução (Tabela 12) o que indica não ter havido solubilização de fases de baixa cristalinidade contendo Al.

Tabela 12. Extração não sequencial de Al após a adição da 2ª solução extratora.

Tratamentos	CTC_mmolckg ⁻¹	Al	pH
KCl_0,1	331,50	96,00	0,00
	CTC2	Al_(2-1)	pH (2-1)
KCl 0,1_KCl 1	316,75	241,00	-1,21
KCl 0,1_NH ₄ Cl	389,25	291,26	-1,29
KCl 0,1_OA	418,00	1928,48	-1,76
KCl 0,1_PS	349,25	24406,09	4,08
KCl 0,1_KCl 0.1	315,25	0,00	-1,10
	CTC_mmolckg ⁻¹	Al	pH
KCl 1	360,25	443,00	0,00
	CTC2	Al_(2-1)	pH (2-1)
KCl 1_KCl 0,1	370,25	0,00	-0,83
KCl 1_NH ₄ Cl	344,50	0,00	-0,96
KCl 1_OA	402,25	1598,75	-1,49
KCl 1_PS	305,00	19434,77	4,22
KCl 1_KCl 1	317,50	0,00	-0,94
	CTC_mmolckg ⁻¹	Al	pH
NH ₄ Cl	401,50	510,59	0,00
	CTC2	Al_(2-1)	pH (2-1)
NH ₄ Cl_KCl 0,1	357,75	0,00	-0,75
NH ₄ Cl_KCl 1	358,75	0,00	-0,84
NH ₄ Cl_OA	426,00	1245,35	-1,81
NH ₄ Cl_PS	359,75	20244,16	3,88
NH ₄ Cl_NH ₄ Cl	379,00	0,00	-0,95

CTC = capacidade de troca de cátions; Al = teor de alumínio; pH = potencial hidrogeniônico; CTC2 = valor da CTC após o uso do segundo extrator; Al_(2-1) = Diferença matemática entre o teor de Al extraído na 2ª extração menos o teor de Al extraído na 1ª extração; pH (2-1) = Diferença matemática entre o valor de pH obtido na 2ª extração menos o valor de pH obtido da 1ª extração; (n=72, 18x2x2).

Outro ponto é que a solução de KCl_1 não seria capaz de retirar Al da entrecamada de vermiculita e esmectita com hidróxi Al na entrecama (VHE/EHE), ideia contrária a de Cunha et al.(2014). Essa afirmação se baseia no fato de que no pré-tatamento da fração argila para difratometria de raios-X se faz a remoção dos óxidos pedogenéticos com ditionito-citrato-bicarbonato e, posteriormente a saturação com KCl_1 e aquecimentos (110°, 350° e 550°) para identificação de VHE/EHE. Dessa forma, apesar da remoção dos óxidos, das saturações com KCl_1 e aquecimentos aparece o polímero de hidróxi-Al na entrecamada (seja da vermiculita ou esmectita) em solos que apresentam VHE/EHE, indicando maior estabilidade termodinâmica dos VHE/EHE.

Tabela 13. Post Hoc (LDS) da extração não sequencial de Al para os horizontes ácidos após a adição da 2ª solução extratora.

		CTC	Al	pH			CTC	Al	pH			CTC	Al	pH
KCl_0,1 ⁽¹⁾	¹ KCl_1			*	KCl_1 ⁽²⁾	² KCl_0,1			*	NH ₄ Cl ⁽³⁾	³ KCl_0,1	*		*
	¹ NH ₄ Cl	*		*		² NH ₄ Cl			*		³ KCl_1	*		*
	¹ OA	*	*	*		² OA	*	*	*		³ OA			*
	¹ PS		*	*		² PS	*	*	*		³ PS	*	*	*
	¹ KCl_0,1			*		² KCl_1	*		*		³ NH ₄ Cl			*
KCl_0,1	KCl_1			*	KCl_1	KCl_0,1			*					
	NH ₄ Cl	*		*		NH ₄ Cl	*		*					

CTC = variável capacidade de troca de cátions; Al = variável alumínio; pH = variável potencial hidrogeniônico. (1) representa a 1ª solução extratora, a solução de cloreto de potássio na concentração de 0,1 mol L⁻¹ (KCl_0,1); (2) representa a 1ª solução extratora, a solução de cloreto de potássio na concentração de 1 mol L⁻¹ (KCl_1); (3) representa a 1ª solução extratora, a solução de cloreto de amônio na concentração de 1 mol L⁻¹ (NH₄Cl).

Para a fração trocável padrão (KCl_1/NH₄Cl_1) não houve diferença estatística significativa para a variável Al após a adição do 2º extrator seja ele KCl_0,1 ou KCl_1 (Tabela 13), entretanto houve para CTC e pH, corroborando com os resultados anteriores (Tabela 11).

Após a adição do OA como 2º extrator para NH₄Cl não houve diferença estatística significativa, mas houve para KCl_1 para as variáveis CTC e teor de Al (Tabela 13). Devido a solução de OA possuir íons de NH₄⁺, isso acarreta no efeito de íon comum para NH₄Cl e de íon não comum para KCl_1, refletindo em maiores teores de Al extraídos em OA posterior a KCl_1 (Tabela 12). Esses resultados indicam possível solubilização de fases minerais 2:1, as quais estão em maiores proporção se comparadas a outros minerais na matriz mineral desse solo.

Após a adição do PS como 2º extrator para KCl_1 e NH₄Cl houve diferença estatística significativa para CTC e Al em ambos os casos (Tabela 13). Embora houve redução de CTC para ambos (KCl_1 e NH₄Cl), os teores de Al extraídos foram maiores na extração com NH₄Cl_PS (Tabela 12), indicando que os íons de NH₄⁺ poderiam ser dessorvidos da matriz mineral 2:1 pelo PS com maior eficácia que a extração de íons de K⁺.

O K⁺ é o cátion presente em micas/ilitas e apresenta bom ajuste na estrutura cristalina desse mineral (Churchman and Lowe, 2012; Fanning et al., 1989). Bem como apresenta fixação preferencial em relação a íons de NH₄⁺ (Abasiyan and Towfighi, 2018). A alteração de borda parece ser o principal mecanismo no processo de adsorção/fixação e dessorção dos cátions K⁺ e NH₄⁺ nesse estudo. O intemperismo de borda é comum em fases 2:1 e promove a dessorção de K⁺/NH₄⁺ da estrutura cristalina (Fanning et al., 1989), bem como a alta concentração externa de íons de K⁺/NH₄⁺ pode acarretar na fixação desses íons na matriz mineral de 2:1 (Fanning et al., 1989).

Os resultados indicam ainda uma fixação preferencial de K⁺ em relação a NH₄⁺ (expresso pelos valores de CTC) de forma geral, e após a adição do 2º extrator (OA, PS) (Tabela 12). Tratando das soluções cloretadas, quando a solução KCl_0,1 de menor concentração posterga a de maior concentração (KCl_1) (KCl_1_KCl_0,1), houve aumento da CTC, indicando que houve liberação de K⁺ fixado (fase sólida), devido a menor concentração da solução favorecer a dessorção para manter o

equilíbrio entre a fase sólida e a solução. Por outro lado, quando a relação foi inversa (KCl_0,1_KCl_1) houve redução da CTC, indicando a influência da concentração da solução a forçar a fixação de K^+ , nessa segunda situação. Quando a solução de NH_4Cl antecede a de KCl seja na maior ou menor concentração (KCl_0,1, KCl_1), a CTC foi similar indicando não haver influência da concentração da solução de KCl para maior dessorção de NH_4^+ .

4.1.4. Modelo proposto da geração da acidez no Vertissolo ácido

A presença de expressivos teores de alumínio (Al) e a acidez em solos argilosos eutróficos ácidos, tem sido creditado a (i) dissolução parcial de compostos de baixa cristalinidade pela solução de KCl 1 mol L^{-1} (Cunha et al., 2015, 2014), (ii) extração de Al da entrecamada de VHE/EHE pela solução de KCl 1 mol L^{-1} (Marques et al., 2002) e (iii) oxidação de materiais sulfídricos (pirita) (Barbiéro et al., 2005). Para identificar a origem dos expressivos teores de Al e a acidez, e se algum desses mecanismos se enquadram nesse estudo, foi realizado a extração não sequencial de alumínio, determinação da CTC e FTIR para verificar se há superestimação de Al trocável via solução de KCl 1 mol L^{-1} , e determinação de enxofre total para verificar se são os materiais sulfídricos os responsáveis pela acidez.

Os resultados obtidos descartam a contribuição de materiais sulfídricos para geração da acidez, uma vez que os teores de enxofre no solo são muito baixos (Tabela 8). Embora a CTC do solo tenha sido alterada em função do extrator utilizado não houve superestimação via uso da solução de KCl 1 mol L^{-1} (Tabelas 10, 11). Sendo assim, os teores de Al trocável nesse Vertissolo parecem de fato corresponder à fração trocável.

Dessa forma, a gênese desse Vertissolo, bem como dos altos teores de Al parece ter envolvido diferentes fatores. A princípio houve ocorrência de um clima passado mais úmido indicado pelos dados de isotopia $\delta^{13}C$ (Tabela 8), em que houve alteração de vegetação C3 nos horizontes subsuperficiais para uma mistura C3 e C4 nos horizontes superficiais, indicando taxas de intemperismo maiores anteriormente, as quais propiciaram a hidrólise e dissolução de filossilicatos 2:1 e da calcita do material de origem (Figura 9 e Tabela 9). A alteração da matriz mineral inorgânica durante um clima pretérito mais úmido, e corroborado pelo clima atual úmido, teria desencadado a formação de esmectitas dioctaedrais (beidelita e montmorilonita) bem como de caulinita, via neogênese (Figura 8 e Tabela 9). No caso da beidelita, a mesma poderia ser também formada via transformação da mica. Assim, houve autigênese de minerais secundários.

A beidelita é uma espécie do grupo da esmectita (Borchardt, 1989) com predomínio (>50%) de carga na camada tetraedral e substituição iônica de silício por alumínio (Malla and Douglas, 1987).

Dessa forma, dentre as espécies de esmectitas é a que contem maior conteúdo de Al estrutural. Beidelita e montmorilonita podem ser provenientes da alteração de feldspatos, bem como de micas, seja por neoformação e/ou transformação (Churchman and Lowe, 2012).

No presente estudo a beidelita estaria sendo mais preservada em relação a montmorilonita por sua razão Si:Al e devido os cátions alcalinos serem perdidos mais facilmente (possuem menor potencial iônico) em estágios iniciais (Churchman and Lowe, 2012). As bandas 913 cm^{-1} e $3620/3630\text{ cm}^{-1}$ (Figura 10A) são da beidelita e originadas da deformação e alongamento das vibrações moleculares dos grupos hidroxyl (AlAl-OH). Já a banda 845 cm^{-1} (deformação AlMg-OH) típica da montmorilonita, foi menos expressiva (Figura 10A). A beidelita pode ocorrer em horizontes ácidos e lixiviados, bem como em ambientes onde a drenagem é restrita e o pH é alcalino (Churchman and Lowe, 2012).

Com a progressão do intemperismo há uma continuidade da hidrólise e da dissolução das fases minerais promovendo a liberação de Al estrutural, bem como de outros cátions, dos minerais primários e secundários. Durante esse processo, parte do Al liberado precipita na forma de fases de baixa cristalinidade (Tabelas 7, 10), parte é adsorvido a compostos orgânicos (Tabelas 7, 10) e parte fica adsorvido via complexos de esfera externa nos sítios de troca (Tabelas 7, 10).

A medida que o Al é liberado, em solução sua hidrólise gera prótons que intensificam a acidez, favorecendo ainda mais a alteração da matriz mineral. Essa alteração teve contribuição das reações redox via ciclos de oxi-redução expressos pela presença de mosqueados e feições de depleção e concentração de ferro na matriz do solo (Figura 12), resultantes da variação da umidade entre os períodos úmidos e secos, bem como decorrente da oscilação do lençol freático (epissaturação) os quais teriam propiciado a oxidação de ferro e favorecido a geração de prótons.

Figura 12. Feições redoximórficas, zonas de depleção e concentração de ferro na matriz do solo.

Dessa forma, o exaurimento de minerais com potencial de tamponar a acidez (calcita), a continuação do intemperismo, hidrólise e dissolução de fases minerais e elementos, bem como do Al

redistribuído nos distintos compartimentos (frações trocável e potencialmente disponível) teriam favorecido o retroabastecimento do sistema e manutenção da acidez e dos teores de Al trocável.

4.2. Vertissolos com predomínio de caulinita na fração argila

O Vertissolo apresentou coloração uniforme em profundidade, sendo esta dominada por matizes amareladas (Tabela 14). Sua textura foi argilosa a muito argilosa (Tabelas 14 e 15) com teores de argila variando de 592 a 735 g/kg.

Tabela 14. Atributos morfológicos do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA.

Hor.	Prof. cm	Cor úmida	Classe textural	Estrutura	Consistência			F, S	T
					Seca	Úmida	Molhada		
Ap	0-6	2,5Y 4/4	arg	mod méd gr	d	fri	mt plas, mt peg	F	cla, pla
BAv	6-28	2,5Y 4/4	mt arg	mod gra mt gra prism, mod gra mt gra bl ang	mt d	f	mt plas, mt peg	F	cla, pla
Bv ₁	28-62	2,5Y 5/4	mt arg	mod gra mt gra prism, mod gra mt gra bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	grad, pla
Bv ₂	62-88	2,5Y 5/4	mt arg	mod mt gra prism, fra mt gra bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	dif, pla
Bv ₃	88-100+	2,5Y 5/4	mt arg	mod mt gra prism, fra mt gra bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F,S	-

(Lima, 2014)

Classe textural: arg = argila, mt arg = muito argilosa.

Estrutura: grau, fra = fraca, mod = moderada, fo = forte; tamanho, mt peq = muito pequena, peq = pequena, méd = média, gra = grande, mt gra = muito grande; tipo, gran = granular, bl ang = blocos angulares, bl sub = blocos subangulares, prism = prismática, maç = maciça.

Consistência: seca, d = dura, mt d = muito dura, ext d = extremamente dura; úmida, fri = friável, f = firme, mt f = muito firme; molhada, plasticidade: mt plas = muito plástica, pegajosidade: mt peg = muito pegajosa.

F = fendas, S = slickensides.

T = Transição: cla = clara, grad = gradual, dif = difusa, pla = plana.

A estrutura foi do tipo granular em superfície e em subsuperfície prismática que se desfaz em blocos angulares, com o tamanho de agregados aumentando em profundidade (Tabela 14). O solo apresentou consistência seca dura a extremamente dura e consistência molhada muito plástica e muito pegajosa, característica comum a essa classe de solo (FAO, 2014). Como feições morfológicas vérticas, apresentou rachaduras, fendas que se estenderam a um metro de profundidade e slickensides (Tabela 14). O processo de contração e expansão considerado um dos processos pedogenéticos desta classe de solo, foi expresso pelo valor do COLEstd e este foi moderado (média 0,05 cm cm⁻¹), indicando o papel da assembleia mineralógica e teor de argila na manifestação das feições morfológicas e vérticas (Tabela 15).

O pH do solo foi alcalino com valores variando de 7,6 a 7,9 e os teores de carbono reduziram em profundidade (Tabela 16). A acidez potencial foi baixa e condizente com os baixos teores de carbono. O complexo de troca se mostrou predominantemente ocupado por cálcio, seguido magnésio, potássio e sódio (Tabela 16). A presença de calcita no material de origem (Figura 16) e sua consequente dissolução parece ter sido a fonte principal de cálcio para esse solo, com sua

posterior precipitação na forma de nódulos de carbonato de cálcio (Figura 13). Embora seja um solo eutrófico ($V > 50\%$) sua CTC apesar de alta, mostrou-se inferior às comumente encontradas para a classe dos Vertissolos (Pal et al., 2009).

Figura 13. Nódulos de carbonato de cálcio, sob luz polarizada cruzada (Lima, 2014).

Tabela 15. Atributos físicos do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA.

Hor.	Prof. cm	AG	AF	Silte g kg ⁻¹	Argila	ADA	GF -- % --	Dp	Ds ₃₃ g cm ⁻³	Ds ₁₀₅	P ₃₃ ----- % -----	P ₁₀₅	COLE std cm cm ⁻¹	S.E m ² g ⁻¹
Ap	0-6	100	151	157	592	302	49	2,61	-	-	-	-	-	91
BAv	6-28	78	105	139	678	345	49	2,78	1,39	1,65	50	41	0,06	-
Bv ₁	28-62	74	103	125	698	323	54	2,70	1,34	1,57	50	42	0,04	86
Bv ₂	62-88	72	100	136	692	343	50	2,78	1,37	1,58	51	43	0,05	-
Bv ₃	88-100+	58	92	115	735	342	53	2,72	1,37	1,60	50	41	0,05	78

(Lima, 2014)

Hor. = horizonte, Prof. = profundidade, AG = areia grossa (2-0.21 mm), AF = areia fina (0.21-0.053 mm), Silte (0.053-0.002 mm), Argila (<0.002 mm), GF = grau de floculação, Dp = densidade de partículas, Ds₃₃ = densidade do solo à 33 kpa, Ds₁₀₅ = densidade do solo à 105°C, P₃₃ = Porosidade do solo à 33 kpa, P₁₀₅ = porosidade do solo à 105°C, COLEstd = coeficiente de extensibilidade linear padrão, S.E = superfície específica.

Tabela 16. Atributos químicos do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA.

Hor.	Prof.	pH (1:2,5)		COT	Eq. CaCO ₃	Complexo sortivo (cmolc kg ⁻¹)								V	PST	P
		cm	Água			KCl	----- g kg ⁻¹ -----	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SB	Al ³⁺			
Ap	0-6	7,60	6,73	13,84	3,88	21,33	3,15	0,37	1,38	26,23	0	1,13	27,36	95,86	1,41	42,90
BAv	6-28	7,80	6,80	5,45	4,00	18,99	3,26	0,60	0,38	23,23	0	0,26	23,49	98,87	2,58	0,93
Bv ₁	28-62	7,83	7,00	3,88	4,19	20,24	3,02	0,46	0,11	23,83	0	0,35	24,18	98,55	1,93	0,85
Bv ₂	62-88	7,98	7,08	3,10	4,00	23,06	2,97	0,76	0,15	26,94	0	0,27	27,21	99,02	2,82	0,83
Bv ₃	88-100+	7,89	7,05	2,85	4,63	22,20	3,04	1,30	0,12	26,66	0	0,09	26,75	99,67	4,88	0,96

(Lima, 2014)

Hor.: Horizonte; Prof.: Profundidade; pH: Potencial hidrogeniônico em água e cloreto de potássio (KCl); COT: Carbono orgânico total; Eq. CaCO₃= Equivalente de carbonato de cálcio; Cátions trocáveis: Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Sódio (Na⁺), Potássio (K⁺); SB: Soma de bases (Ca+Mg+Na+K); Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Percentagem de saturação por bases (SB/CTC)*100; PST: Percentagem de saturação por sódio (Na/CTC)*100; P: Fósforo disponível.

A partir dos resultados das dissoluções seletivas verifica-se que houve predominância de óxidos de ferro de boa cristalinidade, expressa pelos teores de Fe_d (Tabela 17), enquanto a fração de baixa cristalinidade foi pouco representativa.

Tabela 17. Dissolução seletiva do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA.

Hor.	Prof. cm	Fe_d -- dag kg ⁻¹ --	Fe_o	Fe_o / Fe_d	Al_d ---- dag kg ⁻¹ ----	Al_o	Al_o / Al_d
VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico - JUAZEIRO/BA							
Ap	0-6	2,71	0,10	0,04	0,75	0,33	0,44
BAv	6-28	-	-	-	-	-	-
BV ₁	28-62	3,28	0,09	0,03	0,83	0,34	0,41
BV ₂	62-88	-	-	-	-	-	-
BV ₃	88-100+	3,34	0,09	0,03	0,80	0,32	0,41

(Lima, 2014)

Fe = expressa óxido de ferro (Fe_2O_3); Al = expressa óxido de alumínio (Al_2O_3). Os sufixos (d, o) representam as extrações com as soluções de ditionito-citrato-bicarbonato e oxalato ácido de amônio.

A assembleia mineralógica da fração argila deste solo foi constituída por montmorilonita, caulinita, quartzo (Figura 15 e Tabela 18) e interestratificados caulinita-montmorilonita (Figura 17 e Tabela 19). A identificação da espécie esmectítica foi realizada pelo teste de Greene-Kelly e estão apresentadas na Figura 15 (dados de Lima, 2014). Nas frações areia grossa, fina e silte foi identificado apenas quartzo (Figura 14).

Tabela 18. Composição mineralógica das frações areia, silte, argila e do material de origem.

Horizontes/Frações	Areia grossa e fina	Silte	Argila	Material de origem
Ap, BV ₁ , BV ₃	Qz	Qz	Mont., Ct., Qz	Mica, Calcita, Qz

(Lima, 2014)

Qz = quartzo, Mont. = montmorilonita, Ct. = caulinita.

Figura 14. Mineralogia das frações areia (a) e silte (b) do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA. Qz = quartzo. A, Bv1 e Bv3 representam os horizontes.

A partir da observação da morfologia (posição e forma dos picos) nos difratogramas de raios-X verifica-se que nos tratamentos com K (K25, K110, K350) são nítidos os picos 0,74 nm e 0,36 nm, e estes apresentaram abertura a baixos ângulos (Figura 15). Estes picos desaparecem no tratamento de K550, comprovando a presença da caulinita (Figura 15). Verifica-se ainda a presença de esmectita da espécie montmorilonita pelos tratamentos de Li270 e Li270G (Figura 15). A abertura dos picos 0,74 e 0,36 nm indicam uma possível existência de fases minerais interestratificadas, o que de fato foi comprovado pela modelagem dos difratogramas (Figura 17 e Tabela 19). Esmectita e interestratificados Esm-Ct foram encontrados em Vertissolos da Índia derivados de sedimentos coluviais basálticos não calcários e sob clima atual semiárido (BHATTACHARYYA et al., 1993).

Nesse estudo, os atributos morfológicos (rachaduras de até 15 cm, fendas, slickensides, textura, consistência; Tabela 14), físicos (teor de argila, COLE, SE; Tabela 15) e químicos (CTC; Tabela 16) indicaram a presença de fases esmectíticas no Vertissolo. Embora, nos difratogramas fossem pouco nítidas, a modelagem possibilitou a comprovação de fases interestratificadas contendo camadas de caulinita e esmectita, as quais parecem ser os principais responsáveis pela expressão das feições morfológicas vérticas.

Figura 15. Mineralogia da fração argila dos horizontes Ap (a), Bv₁ (b) e Bv₃ (c) do Vertissolo da região de Juazeiro-BA, e seus respectivos tratamentos (K25, K110, K350, K550, Mg, MgG, Li270 e Li270G). Mont = montmorilonita; Sm = esmectita; Kt = caulinita; Qz = quartzo.

Figura 16. . Mineralogia do material de origem do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA. Qz = quartzo.

As características cristaloquímicas e as proporções de cada fase interestratificada são apresentadas na Tabela 19. Quatro fases Ct-Esm compõem a amostra do horizonte Bv₁ e três fases Ct-Esm compõem a amostra do horizonte Bv₃, as quais apresentam % de camadas, N med e N máx distintas.

Tabela 19. Dados das modelagens de amostras MgG dos horizontes Bv1 e Bv3 do Vertissolo Háplico de Juazeiro-BA.

Fases minerais	% camada	d001A	d001B	Fe Ct	Fe 2:1	N med	N máx	% final
H_z Bv₁ (28-62 cm)								
caulinita-esmectita	92-8	7,22	16,9	0,01	0,00	12	39	50
caulinita-esmectita	88-12	7,22	16,9	0,32	0,00	2,9	11	23
caulinita-esmectita	79-21	7,22	16,9	0,92	0,00	2,7	11	23
caulinita-esmectita	38-62	7,22	16,9	0,00	0,28	4	14	4
H_z Bv₃ (88-100 cm[†])								
caulinita-esmectita	90-10	7,22	16,9	0,52	0,00	39	61	27
caulinita-esmectita	83-17	7,22	16,9	0,78	0,00	3,5	11	40
caulinita-esmectita	57-43	7,22	16,9	0,30	0,00	2	8	33

d001A = espaçamento interplanar (Å) do componente mais abundante, d001B = espaçamento interplanar (Å) do componente menos abundante, Fe Ct = quantidade de átomos de Fe octaedral na estrutura da caulinita, Fe 2:1 = quantidade de átomos Fe octaedral na estrutura dos minerais 2:1, N med = número médio de células unitárias (camadas) difratando em um domínio coerente, N máx = número máximo de células unitárias (camadas) difratando em um domínio coerente.

Figura 17. Modelagem de amostra MgG da fração argila dos horizontes Bv₁ (a) e Bv₃ (b). Linha preta representa o padrão da amostra obtida no DRX (MgG). Linha vermelha representa o padrão modelado a partir da introdução de diversas fases minerais no *Newmod*.

A partir da modelagem dos difratogramas de raios-x (MgG) comprova-se a presença de interestratificados caulinita-esmectita (Ct-Esm) (Tabela 19). Além disso, em função da identificação da montmorilonita, pode-se afirmar que o interestratificado presente corresponde a caulinita-montmorilonita. Verifica-se que na modelagem do horizonte Bv₁ (28-62 cm) foi utilizado maior número de fases e camadas caulinita-esmectita que no horizonte Bv₃ (88-100 cm⁺; Tabela 19). Embora ambos horizontes apresentem interestratificados Ct-Esm, o número de fases minerais difere entre os horizontes estudados. No horizonte Bv₁ houve presença de quatro fases minerais, sendo três delas com predominância de camadas de caulinita (> 78 %) e uma com predominância de camadas de esmectita (62%). Por outro lado, o horizonte Bv₃ apresentou três fases minerais, todas com predominância de camadas de caulinita (> 56%) (Tabela 19).

Os resultados apontam para uma autigênese de argilominerais expressos pela presença de montmorilonita e caulinita (Figura 15). A gênese dessas espécies minerais parece ter sido condicionada por um clima passado mais úmido, corroborado pelos dados de isotopia, os quais indicam mistura de vegetação C3 e C4 ($\delta^{13}\text{C}$ -21.51‰). Esta condição climática pretérita teria acarretado na dissolução dos minerais primários (mica e calcita; Figura 16) e levado à precipitação de esmectita e nódulos de carbonato de cálcio (Figuras 15, 13). A esmectita também pode ter sido formada via transformação das fases 2:1 primárias, pois a matriz parental apresentou fases 2:1 (Figura 16). De fato, a transformação de filossilicatos é um processo comumente relatado em Vertissolos (Borchardt, 1989; Churchman and Lowe, 2012).

Com a transição para o clima atual mais seco teria ocorrido a formação de interestratificados Ct-Esm, em que tal assembleia mineralógica parece ter sido preservada ou ter seu intemperismo reduzido devido ao clima semiárido e às baixas taxas de precipitação (535,8 mm) atuais, além das condições químicas favoráveis como o pH alcalino, o complexo de troca com

predomínio de cálcio e a presença de carbonato de cálcio na forma de nódulos (Tabela 16 e Figura 13).

O possível mecanismo gerador das fases interestratificadas teria sido a despolimerização da lâmina tetraedral da montmorilonita com consequente reorganização atômica estrutural no estado sólido, sendo uma transformação gradual, em função da perda parcial de sílica via rede de drenagem, devido a sílica ser solúvel em ampla faixa de pH. Esta primeira etapa pode ter sido favorecida pela ocorrência de uma condição climática mais úmida no passado. A conversão de esmectita à caulinita (caulinização da esmectita), e consequente formação de interestratificados Esm-Ct, via transformações no estado sólido a partir da dissolução da lâmina tetraedral e rearranjo de cátions e grupos hidroxila da lâmina octaedral é citado na literatura (Cuadros and Dudek, 2006; Cuadros, 2012; Cuadros et al., 2009), e acarreta na formação de fragmentos de caulinita dentro de camadas esmectíticas (Dudek et al., 2006).

4.3. Vertissolos Ebânicos

4.3.1. Atributos morfológicos, físicos, químicos e classificação dos solos

Todos os solos/perfis apresentaram rachaduras de pelo menos 1 cm de largura e fendas verticais que estenderam-se além de 50 cm de profundidade, e não apresentaram relação textural (Tabelas 20, 21). A coloração dos perfis variou 10YR 3/1,5 (P1) a 2,5 N (P4) (Tabela 20) e o grupamento textural de argilosa a muito argilosa, desconsiderando os saprolitos (Tabelas 20 e 21).

Todos os solos apresentaram autogranulação (observado em campo) e estrutura do tipo blocos subangulares a angulares, a prismática que se desfez em blocos subangulares a angulares, com grau de desenvolvimento moderado a forte com tamanho de agregados abrangendo desde muito pequena na superfície a muito grande em subsuperfície (Tabela 20). Em campo, foi observado que houve relação inversa entre tamanho de agregados e profundidade, ou seja em subsuperfície (Hz B) os agregados variaram de grande a muito grandes, enquanto nos horizontes superficiais (Hz A) e transicionais (Hz AB) variaram de pequenos a médios, podendo ocorrer grandes. A maior abundância da vegetação e da frequência dos ciclos de umedecimento e secagem em superfície contribuem para formação e diferenciação dimensional dos agregados, sendo estes de menor dimensão e maior estabilidade em superfície, enquanto que em subsuperfície de maiores dimensões e menor estabilidade (Tabelas 20, 21). Os slickensides foram moderados a forte e abundantes nos horizontes subsuperficiais (Hz B, BC, e Cv), o que indica processo ativo de contração e expansão da massa do solo desencadeando a formações de feições verticais e morfológicas (Tabela 20).

Mesmo apresentando expressivos teores de carbono (Tabela 23), a consistência seca dos solos variou de dura a extremamente dura, enquanto a úmida de firme a muito firme, e a molhada de muito plástica a muito pegajosa (Tabela 20), indicando que os compostos orgânicos não mascararam o potencial de contração e expansão desses solos, os quais foram altos conforme indicam os resultados do COLEalt (Tabela 21). Os graus de dureza e friabilidade normalmente foram maiores em profundidade, enquanto o grau de plasticidade e pegajosidade não variaram em profundidade. A nitidez na transição entre os horizontes variou de clara a difusa, e a forma de plana (maior frequência) a ondulada (Tabela 20).

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SIBCS) (EMBRAPA, 2013) os solos foram classificados como VERTISSOLOS EBÂNICOS Órticos típicos (P1, P2, P3, P4), entretanto, de acordo com o World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2014), os solos foram classificados como: (P1) Pellic Vertisol (Grumic/Mazic, Magnesian), (P2, P3, P4) Pellic Vertisol (Grumic/Mazic, Humic).

Tabela 20. Atributos morfológicos de Vertissolos Ebânicos do Brasil.

Hor.	Prof.	Cor	Classe textural	Estrutura	Consistência			F, S	T	AM	E
	cm	Úmida			seca	úmida	molhada				
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE											
Ap	0-8	10YR 3/1,5	arg	fo peq méd gran, fo mod peq méd bl sub	mt d	mt f	mt plas, mt peg	F	cla, pla	A	A
BAv	8-20	10YR 3/2	arg	mod med prism	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	cla, pla	A	A
Bv	20-68	10YR 3/2	arg	fo gra prism	d	f	mt plas, mt peg	F, S	cla, pla	Fra	A
C	68-120	10YR 4/3	fran	maç	lig d	f	lig plas, lig peg	-	cla, irr	Fra	Fra
Cr	120-125cm+	10YR 4/3	fran ar	maç	lig d	mt fri	n plas, n peg	-	-	Fra	Fra
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP											
A	0-16	10YR 3/1	fran arg	fo mt peq méd bl sub	d	f	mt plas, mt peg	F	cla, pla	Fo	A
AB	16-26	10YR 3/1	fran arg	fo méd gra bl sub	mt d	f	mt plas, mt peg	F	cla, pla	Fo	A
Bv1	26-52	10YR 3/1	fran arg	fo gra mt gra bl sub	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	cla, pla	Fo	A
Bv2	52-82	10YR 4/1	mt arg	fo gra bl sub	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	cla, ond	Fo	A
C	82-145	10YR 5/6	arg	maç	-	-	mt pla, peg	-	-	Fo	A
Cr	145cm+	7,5YR 5/8	arg	maç	-	-	mt plas, peg	-	-	Fo	A
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS											
A	0-14	10YR 3/1	arg silt	fo peq bl sub	d	f	mt plas, mt peg	F	grad, pla	A	A
AB	14-27	10YR 3/1	arg	fo méd gra bl sub	mt d	f	mt plas, mt peg	F	grad, pla	A	A
Bv1	27-47	10YR 3/1	arg	fo gra mt gra bl sub	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	grad, pla	A	A
Bv2	47-57	10YR 3/1	arg	fo gra mto gra bl ang bl sub	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	grad, pla	A	A
BC	57-87cm+	10YR 3/1	mt arg	maç	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	cla, pla	A	A
Cr		10 YR 5/1	-	maç			mt plas, mt peg	-	-	A	A
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS											
A	0-14	10YR 2/1	arg	fo mt peq peq bl sub bl ang	d	f	mt plas, mt peg	F	grad, pla	Fra	A
AB	14-30	10YR 2/1	arg	fo peq méd bl sub bl ang	mt d	f	mt plas, mt peg	F	dif, pla	Fra	A
Bv1	30-57	10YR2/1	mt arg	fo méd gra prism, bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	dif, pla	Fra	A
Bv2	57-94	10YR 2/1	mt arg	fo gra mt gra prism, bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	grad, pla	Fra	A
BC	94-110	10YR 2/1	mt arg	fo méd bl sub bl ang	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, S	grad, pla	Fra	A
Cv	110-195	10YR 2/1	mt arg	maç	ext d	mt f	mt plas, mt peg	F, -	-	Fra	A
Cr	195cm+	2,5Y 4/4	fran arg ar	maç	-	-	lig plas, lig peg	-	-	Fra	A

Classe textural: fran = franco, fran ar = francoarenosa, fra arg = francoargilosa, fran arg ar = franco-argiloarenosa, arg silt = argilossiltosa, arg = argila, mt arg = muito argilosa.

Estrutura: grau, fra = fraca, mod = moderada, fo = forte; tamanho, mt peq = muito pequena, peq = pequena, méd = média, gra = grande, mt gra = muito grande; tipo, gran = granular, bl ang = blocos angulares, bl sub = blocos subangulares, prism = prismática, maç = maciça.

Consistência: seca, d = dura, mt d = muito dura, ext d = extremamente dura; úmida, fri = friável, f = firme, mt f = muito firme; molhada, plasticidade: n plas = não plástica, lig plas = ligeiramente plástica, mt plas = muito plástica, pegajosidade: n peg = não pegajosa, lig peg = ligeiramente pegajosa, mt peg = muito pegajosa.

F = fendas, S = slickensides.

T = Transição: cla = clara, grad = gradual, dif = difusa, pla = plana, irr = irregular, ond = ondulada.

AM = atração magnética, A = ausente, Fra = fraca, Fo = forte. E = efervescência cm HCl 10%, A = ausente, Fra = fraca.

Considerando os horizontes pedogenéticos (Hz A e B), a fração argila foi a mais expressiva e variou de 388 a 576 g kg⁻¹ (Hz A, AB, BA) e de 377 a 693 g kg⁻¹ (Hz B), seguida pela fração silte 219 a 399 g kg⁻¹, areia fina 9 a 212 g kg⁻¹, e areia grossa 3 a 140 g kg⁻¹, tendo os Vertissolos textura variando de argilosa a muito argilosa (Tabela 21). Os Vertissolos derivados de rochas ígneas tiveram redução da fração argila e aumento da fração areia em profundidade (P1, P2, P4), enquanto o derivado de rocha sedimentar argilosa (P3), apresentou redução menos acentuada (Tabela 21).

A argila dispersa em água (ADA) variou de 124 a 300 g kg⁻¹ (Hz A, AB, BA) e de 173 a 375 g/kg (Hz B) (Tabela 21). O perfil 1 (P1) apresentou os maiores teores de ADA, seguido pelos demais (P4, P3 e P2). A ADA aumentou em profundidade, exceto no P1, o qual apresentou valores similares de ADA em profundidade. Observou-se uma relação do grau de floculação (GF) com o teor de carbono total (CT). Sendo assim, em profundidade a ADA tendeu a aumentar com a redução do GF e do carbono total (CT) (Tabelas 21 e 23), expressando a importância do carbono na floculação e redução de argila dispersa em Vertissolos, e conseqüentemente na sua melhor agregação.

A densidade de partículas (Dp) aumentou em profundidade em todos os Vertissolos (P1, 2,67 a 2,82; P2, 2,70 a 3,04; P3, 2,47 a 2,78 e P4, 2,22 a 2,86 g cm⁻³), tendo relação direta com as fases inorgânica e orgânica (Tabelas 21 e 23). Nos horizontes com maiores teores de carbono (5,5 a 1,8 %) foi observada menor Dp (2,22 a 2,70 g cm⁻³, horizontes A), e com a proximidade do material de origem a Dp aumentou (2,78 a 3,04 g cm⁻³) evidenciando o papel da matriz mineral inorgânica.

A densidade do solo (Ds) aumentou em profundidade e variou de 1,20 a 1,61 g cm⁻³, apresentando relação inversa com o teor de carbono, direta com o teor de argila, além de relação com a consistência seca. Tratando-se da expansibilidade dos Vertissolos, expressa pelo coeficiente de extensibilidade linear (COLE), este aumentou em profundidade (considerando os horizontes pedogenéticos) (Tabela 21).

Tabela 21. Atributos físicos dos Vertissolos Ebânicos estudados.

Hor.	Prof. cm	AG	AF	Silte g kg ⁻¹	Argila	ADA	GF %	Dp g cm ⁻³	DS ₁₀₅	COLEalt cm cm ⁻¹
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE										
Ap	0-8	124	134	242	500	300	40	2,67	1,34	0,11
BAv	8-20	129	128	247	496	297	40	2,78	1,64	0,22
Bv	20-68	113	130	310	447	311	30	2,82	1,74	0,23
C	68-120	240	255	282	223	161	28	2,82	1,03	0
Cr	120-125cm+	432	240	146	182	118	35	2,82	1,17	0
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP										
A	0-16	133	198	277	392	124	68	2,70	1,40	0,11
AB	16-26	140	201	270	388	152	61	2,76	1,53	0,12
Bv1	26-52	144	212	267	377	173	54	2,76	1,61	0,13
Bv2	52-82	58	110	219	613	354	42	2,90	1,56	0,18
C	82-145	26	134	283	557	293	47	2,99	1,50	0,19
Cr	145cm+	114	213	269	404	175	57	3,04	1,45	0,09
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS										
A	0-14	17	137	399	447	125	72	2,47	1,20	0,13
AB	14-27	6	138	385	472	167	65	2,50	1,39	0,11
Bv1	27-47	6	68	387	539	240	55	2,53	1,44	0,12
Bv2	47-57	3	62	357	579	272	53	2,62	1,35	0,10
BC	57-87cm+	3	52	278	668	346	48	2,74	1,53	0,19
Cr		42	38	326	594	240	60	2,78	1,55	0,20
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS										
A	0-14	16	41	380	563	195	65	2,22	1,22	0,16
AB	14-30	5	40	383	572	251	56	2,53	1,40	0,21
Bv1	30-57	16	26	330	628	312	50	2,55	1,53	0,24
Bv2	57-94	3	9	295	693	375	46	2,58	1,53	0,28
BC	94-110	30	37	208	725	396	45	2,75	1,53	0,32
Cv	110-195	42	42	214	702	400	43	2,82	1,56	0,31
Cr	195cm+	440	55	162	344	192	44	2,86	1,29	0,06

Hor. = horizonte, Prof. = profundidade, AG = areia grossa (2-0.21 mm), AF = areia fina (0.21-0.053 mm), Silte (0.053-0.002 mm), Argila (<0.002 mm), GF = grau de flocculação, Dp = densidade de partículas, DS₁₀₅ = densidade do solo à 105°C, COLEalt = coeficiente de extensibilidade linear alternativo.

Os valores de pH em água aumentaram em profundidade para todos os Vertissolos (Tabela 22). Esses valores variaram de 5,5 a 6,5 (Hz A, AB, BA) e de 5,6 a 7,4 (Hz B), enquanto que os valores de pH em KCl aumentaram em profundidade apenas no P1, nos demais (P2, P3, P4) tendeu a diminuir. Verifica-se, portanto, um saldo de cargas negativas (ΔpH) em todos os Vertissolos, devido tanto a matriz orgânica e inorgânica (Tabelas 22 e Tabela 23).

A soma de bases (SB) aumentou em profundidade e mostrou relação inversa com o grau de intemperismo. A abundância dos cátions trocáveis, os quais contribuíram para SB seguiu a seguinte ordem decrescente, cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) (Tabela 22). Os perfis P1 e P4 foram os que apresentaram os maiores teores de Ca e Mg trocáveis em relação aos demais, indicando papel de minerais primários alteráveis para manutenção da alta SB. O teor de fósforo disponível (P) foi maior que 100 mg kg⁻¹ apenas no P1, enquanto nos demais perfis (P2, P3, P4) os valores permaneceram baixos.

Todos os Vertissolos foram eutróficos ($V > 50\%$) e apresentaram CTC maior que 18 cmolc kg⁻¹ (Tabela 22). A saturação por bases foi maior no P1 (87 - 97%), seguido pelos perfis P4 (83 - 92%), P3 (83 - 88%) e P2 (77 - 88%), enquanto que a CTC foi maior no P4 (40,1 - 48,5 cmolc kg⁻¹), seguido pelos perfis P1 (40,4 - 45,3 cmolc kg⁻¹), P3 (27,7 - 34,6 cmolc kg⁻¹) e P2 (18,5 - 28,2 cmolc kg⁻¹).

Não se verificou alumínio trocável (Al^{3+}) no complexo de troca (Tabela 22), sendo dessa forma, a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) derivada exclusivamente da dissociação de grupos funcionais dos compostos orgânicos (Tabelas 22 e 23). A acidez potencial foi maior no P3, seguido pelos P4, P2 e P1, e não teve relação direta com os teores de carbono.

Tabela 22. Atributos químicos de Vertissolos Ebânicos do Brasil.

Hor.	Prof. cm	pH (1:2.5)		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H+Al	CTC	V	P
		Água	KCl	cmolc kg ⁻¹								%	mg kg ⁻¹
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE													
Ap	0-8	6,0	4,8	16,3	18,2	0,35	0,37	35,2	0	5,2	40,4	87	133,7
BAv	8-20	6,5	4,8	16,6	19,1	0,13	0,66	36,5	0	2,5	39,0	93	108,6
Bv	20-68	7,4	5,5	18,5	23,7	0,18	1,74	44,1	0	1,2	45,3	97	286,3
C	68-120	8,4	6,4	19,7	26,4	0,09	2,32	48,5	0	0,4	48,9	99	636,5
Cr	120-125cm+	8,8	6,9	15,3	20,3	0,11	1,54	37,3	0	0	37,3	100	684,9
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP													
A	0-16	6,0	5,0	11,7	5,1	0,72	0,12	17,6	0	3,7	21,3	83	6,5
AB	16-26	6,1	5,0	12,4	4,3	0,37	0,20	17,4	0	3,2	20,5	85	4,5
Bv1	26-52	6,2	4,9	11,6	3,3	0,21	0,29	15,4	0	3,1	18,5	83	2,8
Bv2	52-82	5,6	4,4	17,8	6,5	0,13	0,42	24,8	0	3,4	28,2	88	1,1
C	82-145	5,2	4,0	17,4	7,6	0,08	0,40	25,5	0	2,9	28,4	90	0,2
Cr	145cm+	6,1	4,3	16,7	8,3	0,08	0,34	25,4	0	1,7	27,1	94	-
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS													
A	0-14	5,5	4,6	16,4	4,0	0,64	0,13	21,2	0	6,5	27,7	77	1,7
AB	14-27	5,6	4,4	16,1	3,2	0,32	0,18	19,7	0	7,7	27,4	72	0,5
Bv1	27-47	5,7	4,3	18,8	3,3	0,25	0,33	22,7	0	8,5	31,2	73	0,3
Bv2	47-57	6,0	4,4	22,1	5,1	0,30	0,51	28,0	0	6,6	34,6	81	0,2
BC	57-87cm+	6,8	5,2	29,8	8,0	0,35	0,80	38,9	0	2,4	41,1	94	0,1
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS													
A	0-14	5,8	4,6	22,2	10,5	0,31	0,33	33,4	0	6,7	40,1	83	0,7
AB	14-30	5,9	4,6	24,5	11,6	0,22	0,33	36,6	0	5,5	42,1	87	3,8
Bv1	30-57	6,3	4,7	27,1	11,9	0,20	0,35	39,5	0	5,2	44,7	88	0,2
Bv2	57-94	6,5	4,8	31,0	13,0	0,19	0,36	44,6	0	3,9	48,5	92	0,2
BC	94-110	6,7	5,0	31,4	15,2	0,20	0,41	47,2	0	2,3	49,5	95	0,1
Cv	110-195	6,7	4,9	32,1	14,8	0,19	0,40	47,6	0	2,1	49,7	96	0,1
Cr	195cm+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hor.: Horizonte; Prof.: Profundidade; pH: Potencial hidrogeniônico em água e cloreto de potássio (KCl); Cátions trocáveis: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Sódio (Na^+), Potássio (K^+); SB: Soma de bases ($\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Na}+\text{K}$); Al^{3+} : Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Percentagem de saturação por bases ($\text{SB}/\text{CTC} \times 100$); P: Fósforo disponível.

4.3.2. Quantidade de carbono, nitrogênio e enxofre, e tipo de grupos funcionais da matéria orgânica

Para todos os Vertissolos os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) reduziram em profundidade (Tabela 23). O teor de carbono dos horizontes superficiais (Hz A) dos Vertissolos Ebânicos (VE) variaram de 1,83 a 5,51% e de 0,57 a 3,86 nos horizontes subsuperficiais (Hz B); enquanto; os teores de N variaram de 0,16 a 0,39% (Hz A) e 0,06 a 0,25% (Hz B). Os maiores teores de C e N foram encontrados em P4, seguido dos perfis P3-P2 e P1 (Tabela 23). Verificou-se que a maioria dos Vertissolos (P1, P2, P4) apresentaram índice melânico (IM) superior a 1,7, fato que indica predominância da fração ácido fúlvico (FAF) em solução em relação a fração ácido húmico. Por outro lado, o P3 apresentou predominância da FAH (IM <1,7) nos horizontes AB e Bv1, e nos demais

horizontes da FAF (Tabela 23). A predominância de ácidos fúlvicos no extrato foi também relatada em Vertissolos na Índia (Arai et al., 1996).

Verifica-se que entre Vertissolos o tipo de vegetação foi diferente (Tabela 23). O P1 apresentou em todo o perfil uma mistura de vegetação, constituída por espécies do tipo C4 (gramíneas) e C3 (arbustivas, arbóreas). No P2, o horizonte superficial (Hz A) foi derivado de vegetação do tipo C4, enquanto que os demais horizontes apresentaram mistura de vegetação (C4 e C3). O P3 apresentou mistura de vegetação (C4 e C3) nos horizontes superficial e transicional superficial (Hz A e AB), enquanto nos horizontes B apresentou vegetação do tipo C4. O P4 apresentou parte de vegetação mista (C4 e C3) nos horizontes A, AB, Bv1 e parte de vegetação do tipo C4 nos demais horizontes (Bv₂, BC e Cv) (Tabela 23).

Quanto aos grupos funcionais da fração ácido húmico (GFFAH) os Vertissolos apresentaram heterogeneidade entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (Tabela 23 e Figura 18). Os perfis P2, P3 e P4 apresentaram GFFAH alifáticos (AL), metoxilas (ME), hidroxilas (HI), acetals (AC), aromáticos (AR), fenoles (FE) e carboxílicos (CA) no horizonte superficial (Hz A), enquanto em subsuperfície (horizonte Bv₁) o P2 apresentou GFFAH: HI, AC, AR, FE e o P3: AL, ME, HI, AC, AR, FE, CA. Embora os horizontes superficiais e subsuperficiais possam ter os mesmos GFFAH (no caso do P3) a intensidade desses GF entre horizontes e Vertissolos foram distintos (Figura 18). A presença de grupos alifáticos, metoxilas, hidroxilas, aromáticos e carboxílicos na fração ácido húmico de horizontes superficiais e subsuperficiais de Vertissolos na Índia foi relatada por Arai et al (1996). Embora qualitativamente o tipo de grupos funcionais fossem similares, quantitativamente foram distintos (Arai et al., 1996). Em Vertissolos da Austrália sob vegetação do tipo C3 e mineralogia composta de esmectita e caulinita, foram encontrados grupos funcionais alifáticos, metoxilas, hidroxilas, aromáticos e carboxílicos em horizontes superficiais e subsuperficiais, e exibiram diferenças quantitativas quanto ao teor de carbono dos grupos funcionais (Krull and Skjemstad, 2003).

Tabela 23. Teores de Carbono (C), Nitrogênio (N) e Enxofre (S) totais, Índice melânico (IM), composição isotópica do carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$), nitrogênio 15 (^{15}N) e grupos funcionais da fração ácido húmico de Vertissolos Ebânicos do Brasil.

	Prof. cm	Total % N	Total % C	Total % S	IM	^{15}N	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Tipo de vegetação	Grupos funcionais ^{13}C NMR
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE									
Hz Ap	0-8	0,160	1,830	0,006	2,48	6,70	-22,04	Mistura C4 e C3	
Hz BAv	8-20	0,076	0,609	0,010	1,69	10,44	-22,35	Mistura C4 e C3	
Hz Bv	20-68	0,064	0,574	0,025	1,78	10,58	-22,10	Mistura C4 e C3	
Hz C	68-120	0,017	0,296	-	-	-	-		-
Hz Cr	120-125+								
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP									
Hz A	0-16	0,280	3,247	0,029	1,98	8,07	-15,23	C4	AL, ME, HI, AC, AR, FE, CA
Hz AB	16-26	0,196	2,151	0,027	1,95	8,88	-16,66	Mistura C4 e C3	---
Hz Bv ₁	26-52	0,184	1,702	0,024	1,97	9,63	-18,93	Mistura C4 e C3	HI, AC, AR, FE
Hz Bv ₂	52-82	0,087	0,845	0,015	2,41	8,40	-19,29	Mistura C4 e C3	---
Hz C	82-145	0,052	0,371	-	-	-	-	-	---
Hz Cr	145+	0,029	0,298	0,009	-	-	-	-	---
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS									
Hz A	0-14	0,274	3,341	0,023	1,77	8,49	-18,73	Mistura C4 e C3	AL, ME, HI, AC, AR, FE, CA
Hz AB	14-27	0,228	2,932	0,017	1,70	8,76	-17,42	Mistura C4 e C3	---
Hz Bv ₁	27-47	0,163	2,657	0,011	1,64	8,59	-15,26	C4	AL, ME, HI, AC, AR, FE, CA
Hz Bv ₂	47-57	0,135	1,966	0,008	1,92	8,52	-14,98	C4	---
Hz BC	57-87+	0,099	1,274	0,004	1,99	8,03	-15,95	C4*	---
Hz Cr	---	0,040	1,015	0,002	-	-	-	-	---
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS									
Hz A	0-14	0,399	5,510	0,029	1,98	6,65	-20,16	Mistura C4 e C3	AL, ME, HI, AC, AR, FE, CA
Hz AB	14-30	0,249	3,618	0,045	2,12	7,89	-17,01	Mistura C4 e C3	---
Hz Bv ₁	30-57	0,230	3,864	0,005	2,06	7,49	-16,10	Mistura C4 e C3	---
Hz Bv ₂	57-94	0,149	3,110	0,002	1,78	6,86	-15,31	C4	---
Hz BC	94-110	0,081	1,293	0,002	-	6,28	-15,27	C4	---
Hz Cv	110-195	0,054	1,018	0,005	-	5,68	-15,25	C4	---
Hz Cr	195+	0,017	0,309	0,000	-	-	-	-	---

N = nitrogênio, C = carbono, S = enxofre, Índice melânico (IM), $\text{IM} \leq 1,7$ (Melanic); $\text{IM} > 1,7$ (Fulvic), o IM dá ideia se há predominância da fração ácidos húmicos (FAH) ou da fração ácidos fúlvicos (FAF) em extrato alcalino; $\delta^{13}\text{C}$ de -9 a -17, média de -13 forte influencia de plantas C4 (gramíneas), $\delta^{13}\text{C}$ de -16 a -22 mistura de plantas C4 e C3, $\delta^{13}\text{C}$ de -22 a -32, média de -27 forte influencia de plantas C3 (arbustivas, arbóreas), $\delta^{13}\text{C}$ de -10 a -30 CAM facultativas (Boutton, 1991; Boutton et al., 1998); Grupos funcionais: AL, alifáticos (0-46 ppm), ME, metoxilas (46-60 ppm), HI, Hidroxilas (60-95 ppm), AC, Acetales (95-110 ppm), AR, Aromáticos (110-140 ppm), FE, Fenoles (140-160 ppm), CA, Carboxílicos (160-220 ppm).

Tabela 24. Teores de Carbono (C), Nitrogênio (N) e Enxofre (S) da fração humina (FH) de Vertissolos.

	FH	FH	FH	(CFHUM/CT)*100
	% N	% C	% S	%
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE				
Hz A	0,113	1,609	0,017	87,9
Hz Bv	0,040	0,650	0,013	113,2
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP				
Hz A	0,172	2,260	0,042	69,6
Hz Bv ₁	0,103	1,251	0,002	73,5
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS				
Hz A	0,151	2,326	0,003	69,6
Hz Bv ₁	0,113	2,092	0,007	78,7
Hz BC	0,109	1,439	0,001	113,0
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS				
Hz A1	0,304	4,804	0,023	87,2
Hz Bv ₁	0,193	3,827	0,001	99,0
Hz BC	0,070	1,553	0,000	120,1

CHUM/CT*100 = teor do carbono total da fração humina dividido pelo teor de carbono total do solo multiplicado por cem, resultados expressos em porcentagem (%).

Figura 18. Grupos funcionais da fração ácido húmico de Vertissolos via ^{13}C NMR. 1-) 0-46 ppm (AL) alifáticos, 2-) 46-60 ppm (ME) metoxilas, 3-) 60-95 ppm (HI) hidroxilas, 4-) 95-110 ppm (AC) Acetales, 5-) 110-140 ppm (AR) aromáticos, 6-) 140-160 ppm (FE) fenoles, 7-) 160-220 ppm (CA) carboxílicos.

4.3.3. Assembleia mineralógica das frações areia, silte, argila e material de origem

A mineralogia dos Vertissolos Ebânicos estudados foi complexa. Entre Vertissolos a mineralogia foi heterogênea.

A assembleia mineralógica foi identificada da seguinte maneira: o anfibólio foi identificado com base nos picos 0,84 a 0,86 nm, os plagioclásios (Fd-Ca e Fd-Na) com base nos picos 0,64 - 0,65, 0,44 - 0,45, 0,40, 0,37 - 0,38, 0,318 - 0,320, o feldspato com base nos picos 0,37-0,38, 0,317 - 0,320 nm e o quartzo com base nos picos 0,421 - 0,430, 0,333 - 0,334, 0,245-0,246, 0,228, 0,223-0,224 nm.

A muscovita foi identificada com base nos picos 0,98 - 1,00, 0,500, 0,333 - 0,335 nm nos tratamentos de K, a illita com base nos picos 1,00-1,20 nm nos tratamentos de K e Mg, a vermiculita com base no colapso a 1,00 nm nos tratamentos de K, e 1,40 nm nos tratamentos com Mg (Mg e MgG) (Ulery and Drees, 2008).

A esmectita foi identificada pela expansão a 1,6 - 1,8 nm no tratamento MgG (Ulery and Drees, 2008). A diferenciação entre espécies de minerais do grupo da esmectita foi realizada via teste de Greene-Kely (Greene Kelly, 1953) e FTIR. A expansão no tratamento Li270G indica a presença de beidelita/nontronita, ou seja minerais esmectíticos com natureza de carga na camada tetraedral, enquanto que o colapso a 1,00 nm no Li270 e Li270G indica a presença de montmorilonita, e natureza de carga na camada octaedral (Malla and Douglas, 1987). A distinção entre nontronita e beidelita foi realizada via FTIR. A nontronita apresenta bandas de 3560 - 3590 cm^{-1} , 870 - 885 cm^{-1} , a beidelita bandas de 3620/3630/3660 cm^{-1} , 912 - 915 cm^{-1} , a montmorilonita 3622/3660 cm^{-1} , 840 - 845 cm^{-1} , a muscovita dubleto de 757 - 770 e 818 - 820 cm^{-1} , e a banda de 620 cm^{-1} indica Mg_3OH (Bishop et al., 2008; Chukanov, 2014; Madejová and Komadel, 2001; Mink et al., 1993; Wilson, 1994). A presença de ions de NH_4^+ são evidentes nas bandas entre 3000 - 3300 cm^{-1} e 1402 -1430 cm^{-1} (Chukanov, 2014; Madejová and Komadel, 2001; Mink et al., 1993). As bandas 1600 - 1630 cm^{-1} e 3425 - 3430 cm^{-1} são da água estrutural.

A caulinita foi identificada com base nos picos 0,700 - 0,730 nm, 0,351 - 0,355 nm e colapso no tratamento de K550 (Ulery and Drees, 2008). A presença de interestratificados foi observada com base na morfologia dos picos e espaçamento interplanar.

A fração areia do P1 foi constituída por quartzo (Qz) e feldspato (Fd) no horizonte A; vermiculita, mica, anfibólio, Fd, Qz, no horizonte Bv e no Cr, entretanto nesse ultimo o Qz foi o menos expressivo (Figura 19).

Figura 19. Mineralogia da fração areia fina (FS) e areia grossa (CS) dos horizontes A, Bv e Cr do perfil de Cachoeirinha-PE (P1). Anf = anfíbólio, Verm = vermiculita, Fd = feldspato, Qz = quartzo.

Na fração silte, os horizontes A e Bv apresentaram vermiculita, anfíbólio, Fd e Qz, enquanto que no Cr vermiculita, mica, anfíbólio, feldspato e o quartzo como o menos expressivo (Figura 20).

Figura 20. Mineralogia da fração silte dos horizontes A, Bv e Cr do perfil de Cachoeirinha-PE (P1). Verm = vermiculita, Anf = anfíbólio, Fd = feldspato, Qz = quartzo.

A fração argila dos horizontes A e Bv foi composta por ilita, vermiculita, montmorilonita, nontronita (Figuras 21 e 22) e interestratificados dessas espécies minerais (dados não apresentados), entretanto no horizonte A foi mais evidente a montmorilonita, enquanto que no horizonte Bv a nontronita (Figura 22). O Cr apresentou mica, ilita, vermiculita, e nontronita (Figura 21), enquanto o material de origem minerais do tipo 2:1 (vermiculita), mica, anfíbólio, feldspato e quartzo (Figura 32a).

Figura 21. Mineralogia da fração argila dos horizontes A (a), Bv (b) e do Cr (c), e os tratamentos com potássio, magnésio e lítio do perfil de Cachoeirinha-PE (P1). B/N = beidelita/nontronita, Sm = esmectita, Verm = vermiculita.

Figura 22. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da fração argila dos horizontes A e Bv do perfil de Cachoeirinha-PE (P1). Evidenciando as bandas da nontronita e montmorilonita.

O P2 apresentou como espécies minerais nas frações areia e silte, quartzo, plagioclásio e ilmenita nos horizontes A e Bv₁, enquanto que no C esmectita, caulinita, plagioclásio, quartzo, e ilmenita (Figura 23). Na fração argila de todos os horizontes desse perfil, a mineralogia foi composta por illita, vermiculita, beidelita e caulinita (Figuras 24, 25). O material de origem foi constituído de piroxênio, plagioclásio e Qz (Figura 32b). A presença de piroxênio, plagioclásio calco-sódicos, ilmenita, magnetita e quartzo em material de origem do tipo diabásio foram registrados por (Clemente and Marconi, 1994; Demattê et al., 1999).

Figura 23. Mineralogia da fração areia (a) e silte (b) dos horizontes A, Bv₁ e C do perfil de Piracicaba-SP (P2). Qz = quartzo, Pl = plagioclásio, Ilm = ilmenita.

Figura 24. Mineralogia da fração argila dos horizontes A (a), Bv1 (b) e do C (c), e os tratamentos com potássio, magnésio e lítio do perfil de Piracicaba-SP (P2). B/N = beidelita/nontronita, Sm = esmectita, Kt = caulinita.

Figura 25. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da fração argila dos horizontes A, Bv1 e C do perfil de Piracicaba-SP. Evidenciando as bandas da caulinita e beidelita.

As frações areia e silte de todos os horizontes (Hz A, Bv₁ e BC) do P3 foi composta por plagioclásio/feldspato e Qz (Figura 26). A fração argila dos horizontes A e Bv1 foi composta por illita, e montmorilonita rica em Al (Figura 27, 28), enquanto o BC foi composto por illita, vermiculita, beidelita e montmorilonita (Figura 27). O material de origem foi constituído por minerais 2:1, feldspato e quartzo (Figura 32c).

Figura 26. Mineralogia da fração areia (a) e silte (b) dos horizontes A, Bv1 e BC do perfil de Candiota-RS/Aceguá (P3). Qz = quartzo, Pl = plagioclásio, Fd = feldspato.

Figura 27. Mineralogia da fração argila dos horizontes A (a), Bv1 (b) e do BC (c), e os tratamentos com potássio, magnésio e lítio do perfil de Candiota-RS/Aceguá (P3). Mont = montmorilonita, Sm = esmectita, Qz = quartzo.

Figura 28. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da fração argila dos horizontes A, Bv1 e BC do perfil de Candiota-RS/Aceguá (P3).

Piroxênio, plagioclásio e quartzo foram os minerais constituintes da fração areia e silte em todos os horizontes (A, Bv₁, BC, Cv) do P4 (Figura 29). A fração argila foi constituída por illita, vermiculita, beidelita, beidelita férrica e caulinita (Figuras 30, 31).

Figura 29. Mineralogia da fração areia (a) e silte (b) dos horizontes A, Bv1, BC e Cv do perfil de Santana do Livramento-RS/Escobar (P4). Pl = plagioclásio, Qz = quartzo, Fd = feldspato.

Figura 30. Mineralogia da fração argila dos horizontes A (a), Bv1 (b), BC (c) e Cv (d), e os tratamentos com potássio, magnésio e lítio do perfil de Santana do Livramento-RS/Escobar (P4). B/N = beidelite/nontronite, Sm = esmectita.

Figura 31. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da fração argila dos horizontes A, Bv1, BC e Cv do perfil de Santana do Livramento-RS/Escobar (P4).

Figura 32. Mineralogias do material de origem do perfil de Cachoeirinha-PE (a), do material de origem (R, diabásio) e do saprólito (Cr) do perfil de de Piracicaba-SP (b) e do material de origem do perfil de Candiota-RS/Aceguá (c).

4.3.4. Assembleia mineralógica, transformações mineralógicas e autigênese de minerais

Todos os Vertissolos apresentaram minerais primários e secundários em sua matriz (Figuras 19, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30). Alguns minerais primários herdados do material de origem permaneceram principalmente nas frações areia e silte, outra parte dos minerais primários foi

alterada e propiciaram a formação de minerais secundários, havendo autigênese (Figuras 19-22, 23-25, 26-28, 29-31). Com base na mineralogia dos Vertissolos verifica-se bissialização com predomínio de fases esmectíticas (P1, P3), e bissialização conjuntamente à monossilização, com fases esmectíticas e cauliniticas (P2, P4).

Embora outros fatores de formação como organismos e relevo possam influenciar nas alterações mineralógicas, o clima foi o de maior peso para preservação/manutenção de fases esmectíticas, pois em ambiente com maior déficit hídrico e altas temperaturas, o qual reduz a taxa de intemperismo e lixiviação favoreceu a formação e conservação de nontronita e montomorilonita (P1), entretanto verifica-se que a nontronita é metaestável e tende a alterar se aumentada a entrada de água no sistema (Figuras 21, 22). A medida que o clima torna-se mais úmido (mais água disponível, maior tempo de residência da água no solo) e frio existem fases esmectíticas entretanto com uma ausência ou incipiente desenvolvimento de caulinita (P3 e P4). E quando o clima é úmido e as temperaturas intermediárias existem fases esmectíticas e cauliniticas, no entanto verifica-se maior abundância de caulinita e esta de melhor cristalinidade (Figuras 21-22, 24-25, 27-28, 30-31).

Mesmo em material de origem com altos conteúdos de ferro (P4), a nontronita formada pode ter sido alterada devido sua menor estabilidade termodinâmica sob condições úmidas; em especial pela redução do ferro estrutural octaedral, seja via atividade microbiológica seja pelas variações de Eh. Dessa forma, o alumínio permanece no sistema e aliado ao aporte de matéria orgânica a qual favorece a adsorção e complexação do alumínio, favorecendo a formação e manutenção da beidelita.

Em clima úmido, temperaturas intermediárias, menor tempo de residência da água no solo, e melhores condições de drenagem tem-se a formação de beidelita, devido o alumínio tender a permanecer no solo e a matéria orgânica favorecer a manutenção de sílica no sistema, bem como da formação de caulinita e esta de melhor cristalinidade e relativa abundância (P2) (Figuras 24, 25). A vegetação afeta na dissolução e (re)precipitação de minerais contendo silício (Clymans et al., 2011), dessa forma impacta na atividade de silício em solução, o qual é fundamental à manutenção de espécies minerais.

Tabela 25. Teores pseudototais e distribuição de elementos traços e macro elementos entre Vertissolos.

	Cu ²⁺ mg kg ⁻¹	Zn ²⁺ mg kg ⁻¹	Ni ²⁺ mg kg ⁻¹	Cromo mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	Al ³⁺ mg kg ⁻¹	Ca ²⁺ mg kg ⁻¹	Mg ²⁺ mg kg ⁻¹	Na ⁺ mg kg ⁻¹	K ⁺ mg kg ⁻¹	CALMAG %
(P1) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Cachoeirinha-PE											
H _z A	18	35	185	306	23	25810	6300	6400	165	730	19,4
H _z B _v	25	46	260	397	25	29410	8600	13000	443	680	13,9
H _z Cr	25	58	341	504	20	20420	23000	29500	590	2680	4,4
(P2) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Piracicaba-SP											
H _z A	72	94	13	7	18	24170	4530	1320	55	450	32,8
H _z B _v ₁	67	97	12	8	18	24850	4370	740	80	190	32,3
H _z Cr	137	149	27	7	15	36730	10170	2600	372	170	25,4
(P3) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Aceguá-RS											
H _z A	20	36	9	7	16	19570	5530	3100	131	3080	21,1
H _z B _v ₁	9	33	8	9	18	22840	7060	4000	166	3610	19,6
H _z C	10	42	17	16	20	36520	36600	8000	386	-	8,8
(P4) VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico - Escobar-RS											
H _z A	62	76	25	29	16	37490	11700	3700	445	520	22,3
H _z B _v ₁	64	74	27	34	16	42360	13710	3800	297	470	22,2
H _z C	74	58	78	97	14	48020	22800	5000	3780	550	16,9

Cu²⁺ = cobre, Zn²⁺ = zinco, Ni²⁺ = níquel, Pb = chumbo, Al³⁺ = alumínio, Ca²⁺ = cálcio, Mg²⁺ = magnésio, Na⁺ = sódio, K⁺ = potássio, índice de intemperismo = CALMAG.

4.3.5. Gênese de VERTISSOLOS EBÂNICOS

Embora os Vertissolos estudados se enquadrem a nível de ordem e subordem em Vertissolos Ebânicos, apresentam histórias de evolução e desenvolvimento distintos, em que os fatores de formação tiveram maior ou menor peso para manifestação de seus atributos, e dessa forma apresentam particularidades e comportamento distintos mesmo apresentando similaridades.

Houve autigenese de espécies esmectíticas as quais se concentraram principalmente na fração argila, além de caulinita. Nas frações areia e silte se concentraram minerais primários herdados do material de origem. Assim os processos de bissialização (P1, P3) e bissialização juntamente com monossialização (P2, P4) são expressos via a transformação e neoformação de argilominerais que ocorreram nos Vertissolos.

Esses argilominerais (principalmente as fases esmectíticas) apresentam alta área superficial específica, CTC e potencial de expansão e contração (Tabelas 21, 22). A partir dessas características o desenvolvimento de agregados e pigmentação foram favorecidos. A pedalização foi verificada via transformação do material de origem, matriz sólida apedal (maciça) em agregados de tamanho grande a muito grande com moderado a forte grau de desenvolvimento e tipo de estrutura variando de blocos a prismática nos horizontes B (Tabela 20).

A pedalização foi desencadeada pelos ciclos de umedecimento e secagem, pelo processo de contração e expansão e pela vegetação. Os ciclos de umedecimento e secagem ocorrem em todos os horizontes no entanto são mais frequentes em superfície e juntamente ao desenvolvimento radicular contribuem para o fracionamento dos agregados, em que na superfície são de menores dimensão e maior estabilidade (Tabelas 20, 21). Já em subsuperfície os agregados são maiores e de menor

estabilidade (Tabelas 20, 21), indicando a importância da flora e fauna na formação, desenvolvimento, estabilização e fracionamento desses agregados.

A pedalização foi potencializada pelo processo de contração e expansão favorecido pela matriz mineral inorgânica que apresenta potencial de contrair e expandir (Tabela 21 e Figuras 21, 24, 27, 30), tal processo exerce uma energia organizadora e reorganizadora na matriz do solo, devido as deformações plásticas ocorridas durante a hidratação e desidratação dos constituintes minerais, bem como da pressão e tensões ocorridas durante o processo de expansão e contração. O potencial de contração e expansão foi menor em superfície, aumentou em subsuperfície e reduziu em saprólitos derivados de rochas ígneas-metamórficas, enquanto que em saprólitos de rochas sedimentar argilosa permaneceu alto (Tabela 21).

A expressão do processo de contração e expansão, o qual se dá em função do potencial de expansão e contração da matriz mineral inorgânica indica um processo de argiloturbação ativo e sendo um dos responsáveis da gênese dos Vertissolos.

Esse processo de contração e expansão também tem forte peso para pigmentação da matriz mineral (melanização) em que o carbono proveniente da flora e decomposto pela microfauna do solo é incorporado à matriz mineral em função da deformação plástica e da pressão e tensão que a matriz mineral inorgânica sofre durante as flutuações de umidade.

Embora o processo de contração e expansão contribua na incorporação de carbono à matriz mineral inorgânica e conseqüentemente para sua pigmentação (melanização), o processo de humificação parece ser o principal responsável pela pigmentação (desenvolvimento de coloração escura), o qual é devido à decomposição da matéria orgânica. O ambiente eutrófico (alta SB e CTC) e alta ASE dos argilominerais favorecem o desenvolvimento da vegetação e de microrganismos, bem como fornecem sítios de adsorção aos constituintes orgânicos. Especificamente no perfil 4 (P4) a matriz mineral inorgânica teve peso na pigmentação, pois apresentou minerais de coloração escura, os quais contribuíram na pigmentação.

A gênese e preservação do carbono no Vertissolo Ebânico situado em um ambiente semiárido com precipitação média anual vigente de 551 mm (P1) foi resultante de um clima passado mais úmido indicado pela mistura de vegetação C3 e C4 (Tabela 23), o qual favoreceu o desenvolvimento da vegetação, as quais são responsáveis pelo input primário de carbono ao solo. As condições favoráveis de umidade e a abundância de nutrientes propiciaram o input de carbono bem como a decomposição dos constituintes orgânicos favorecendo a transformação do carbono a formas de maior complexidade molecular estrutural as quais desenvolveram grupos ionizáveis, expressos pelos grupos funcionais aromáticos, fenólicos e alifáticos (Tabela 26 e Figura 33), bem como pelo expressivo grau de humificação (Tabela 24) o qual reflete o teor de carbono retido na fração humina. Esta fração é fortemente relacionada a matriz mineral inorgânica (Almeida et al.,

2012; Lehmann and Kleber, 2015; Sanderman et al., 2017), e é insolúvel em meios ácido e alcalino (Benites et al., 2003).

Tabela 26. Identificação por FTIR de bandas de grupos funcionais de compostos orgânicos e de minerais inorgânicos.

Bandas espectrais Wavenumber (cm ⁻¹)	Grupos funcionais (GF) Orgânicos	GF nos Horizontes	Minerais Inorgânicos
1644	Aromáticos ⁽²⁾	A e B (P1, P2, P3, P4)	Deformação grupo OH ⁽¹⁾
1584	Carboxílicos ⁽²⁾		
1434	Alifáticos ⁽²⁾	A e B (P1, P4)	Deformação NH ₄ (Ions NH ₄ ⁺) ⁽¹⁾
1370	Fenólicos ⁽²⁾	A e B (P1)	
1162	Éteres ⁽²⁾		
1103	Álcoois ⁽²⁾	A e B (P1, P2, P3, P4)	Alongamento Si-O ⁽¹⁾
1037	Polissacarídeos (celulose, hemicelulose) ⁽²⁾	A e B (P1, P2, P3, P4)	Alongamento Si-O ⁽¹⁾
912-917			Deformação AlAlOH ⁽¹⁾
870-885			Deformação AlFeOH ⁽¹⁾
840-846			Deformação AlMgOH ⁽¹⁾

P1 = perfil 1 (Cachoeirinha-PE), P2 = perfil 2 (Piracicaba-SP) P3= perfil 3 (Aceguá-RS), P4 = perfil 4 (Escobar-RS).

Referências: ⁽¹⁾(Madejová and Komadel, 2001), ⁽²⁾(Dhillon et al., 2017)

Figura 33. Subtração espectral a partir de amostras com e sem matéria orgânica dos horizontes A e B dos Vertissolos Ebônicos (P1, P2, P3, P4).

A autigênese de espécies esmectíticas (Figuras 21, 24, 27, 30), as quais apresentam alta área superficial específica e CTC (Tabela 22) favoreceram os processos de adsorção e complexação. A interação entre os constituintes orgânicos e inorgânicos se deu via mecanismo de pontes de cátions polivalentes não metálicos e metálicos (Tabela 25), os quais foram resultantes da geologia complexa e do material de origem singular dessa área (Tabela 3), o qual apresentou elevados teores de cátions polivalentes metálicos (níquel e cromo) e não metálicos (cálcio e magnésio) (Tabela 25), e também pela interação eletrostática com a superfície das partículas minerais (Tabela 24).

Por outro lado, a gênese dos Vertissolos Ebônicos situado em clima úmido subúmido e frio (P3 e P4) se deu pela maior umidade (maior tempo de residência da água no solo) e menores

temperaturas (Tabela 3), que desfavorecem a decomposição da matéria orgânica pela ação microbiana e propiciam no maior acúmulo de carbono.

Dessa forma, se verifica que os mecanismos de proteção física e físico-química os quais contribuem para preservação e estabilização do carbono no solo, são co-presentes e co-atuantes nesse estudo. Além de que a recalcitrância estrutural de compostos orgânicos e os processos múltiplos ambientais são modelos que parecem ser co-presentes e complementares para explicar a permanência/preservação do carbono nos Vertissolos Ebônicos, os quais apresentaram alto potencial para estabilizar carbono.

5. CONCLUSÕES

Referentes ao tópico Vertissolos ácidos

- A acidez do Vertissolo Háplico foi causada pela hidrólise e dissolução, favorecidos pela composição da matriz mineral parental, a qual apresentou filossilicatos do tipo 2:1 com presença de alumínio na lâmina tetraedral, pelo clima pretérito mais úmido e o atual úmido e relevo suave ondulado, os quais promoveram a solubilização, transformação e neogênese de minerais, expressos pela presença de esmectitas dioctaedrais, caulinita, interestratificados e fases discretas de Al de baixa cristalinidade.
- Os resultados indicam que para esse estudo as soluções de KCl e NH_4Cl na concentração de 1 mol L^{-1} foram adequadas para quantificação do Al trocável, mas promoveram alteração da CTC do solo. Não dissolveram fases discretas de baixa cristalinidade e parecem causar desprotonação de grupos funcionais de compostos orgânicos, e assim poderiam superestimar a fração trocável dependendo do teor de carbono e tipo de grupo funcional dos compostos orgânicos. A solução de KCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ não foi adequada para estimar o Al trocável, pois subestimou o Al dessa fração. A solução de pirofosfato de sódio (PS) embora represente a fração do Al contido/ligado a compostos orgânicos, não foi seletiva e extraiu Al de outras frações, principalmente da fase mineral inorgânica (filossilicatos 2:1).
- De modo geral, as soluções extratoras promoveram alterações mineralógicas que causaram redução ou aumento da CTC do solo. Dessa forma, pode-se sugerir o uso da solução de MgCl_2 1 mol L^{-1} para estimar o Al trocável, quando a assembleia mineralógica for composta por mica/ilita, vermiculita, minerais que podem fixar íons de K^+ e NH_4^+ , pois o Mg^{2+} não apresenta afinidade para ser fixado à estrutura cristalina desses minerais, e assim não afetaria a CTC do solo.
- Como contribuição ao SiBCS, é sugerida a adição do caráter alítico para a ordem dos Vertissolos. Do ponto de vista agrônomo, a relação entre mineralogia e extratores aqui estudados, tem implicações diretas na geração da acidez, no cálculo da necessidade de corretivos e na dinâmica de aplicação de fertilizantes.

Referentes ao tópico Vertissolo com predomínio de caulinita na fração argila

- O presente estudo comprovou a presença de interestratificados caulinita-esmectita, sendo estes os principais responsáveis pela expressão das feições morfológicas e vérticas no Vertissolo em estudo. A presença de interestratificados esteve mais relacionada à pedogênese e se deu via transformações mineralógicas graduais, sendo o mecanismo de

perda da lâmina tetraedral de fases esmetíticas via reações no estado sólido um possível responsável pela geração dos interestratificados.

- O Vertissolo apresentou textura argilosa a muito argilosa, mas o fator que pareceu ser de maior importância na manifestação das feições vérticas e morfológicas desse Vertissolo foi a presença de esmetita (montmorilonita) nos interestratificados detectados pela modelagem. Foi observado um processo de caulinitização da montmorilonita com formação de interestratificados caulinita-esmetita (montmorilonita), os quais estariam sendo preservados dado o clima atual semiárido (536 mm de precipitação e evapotranspiração de 2694 mm) e das condições químicas favoráveis tais como o pH alcalino e a predominância de cálcio no complexo de troca.

Referentes ao tópico Vertissolos Ebânicos

- Os Vertissolos derivados de distintos materiais de origem demonstraram diferenciação mineralógica e de sua composição química matricial. Houve autigênese, transformação e neogênese de esmetitas, com formação de esmetitas dioctaedrais. Nontronita, beidelita, montmorilonita, montmorilonita rica em alumínio, beidelita férrica, caulinita e interestratificados foram minerais presentes na fração argila, enquanto na fração areia e silte minerais primários alteráveis (piroxênio, anfíbólio, mica, plagioclásio, feldspato) e quartzo, os quais foram herdados do material de origem. A presença de caulinita pode ser considerado um marcador de pedogênese em Vertissolos, além de que a quando esta apresenta melhor ordenamento estrutural este aspecto parece estar bastante relacionado ao tempo de residência de água no solo.
- A gênese do Vertissolo Ebânico situado em clima semiárido esteve relacionado a um clima passado mais úmido e aliado ao ambiente eutrófico favoreceu o desenvolvimento da vegetação e consequentemente do input de carbono. A transformação dos componentes orgânicos primários a formas de maior recalcitrância estrutural, bem como sua associação às partículas minerais por pontes de cátions polivalentes metálicos e não metálicos e pela interação eletrostática favoreceu sua estabilização e permanência no solo. Enquanto que a gênese dos Vertissolos Ebânicos de clima úmido subúmido foram desencadeados pelo clima úmido e frio que favoreceu a menor taxa de decomposição e consequentemente o acúmulo de carbono no solo.

REFERÊNCIAS

- Abasiyan, S.M.A., Towfighi, H., 2018. Kinetics of Competitive Fixation of Potassium and Ammonium Ions by Silt Component of Soils from Different Agro-Climatic Regions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 49, 675–688. doi:doi.org/10.1080/00103624.2018.1432635
- Ahmad, N., 1985. Acid Vertisols of Trinidad, in: *Taxonomy and Management of Vertisols and Aridisols. Sudan*, pp. 140–151.
- Almeida, J.A. de, Mari Lúcia Campos, Fereira, É.R.N., Gatiboni, L.C., 2010. FORMAS DE ALUMÍNIO EM SOLOS DO ACRE. *ACRE*.
- Almeida, H.C., Dick, D.P., Bertotto, F.L., Chitarra, G.S., 2012. Distribution of chemical compartments of soil organic matter and c stocks of a cambisol from south Brazil as affected by Pinus afforestation. *Quim. Nova* 35, 1329–1335. doi:10.1590/S0100-40422012000700009
- Andrén, C.M., Rydin, E., 2009. Which aluminium fractionation method will give true inorganic monomeric Al results in fresh waters (not including colloidal Al)? *J. Environ. Monit.* 11, 1639–1646. doi:10.1039/b902846c
- Aouada, F.A., De Moura, M.R., De Abreu Menezes, E., De Araújo Nogueira, A.R., Mattoso, L.H.C., 2008. Hydrogel synthesis and kinetics of ammonium and potassium release | Síntese de hidrogéis e cinética de liberação de amônio e potássio. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 1643–1649.
- Arai, S., Hatta, T., Tanaka, U., Hayamizu, K., Kigoshi, K., Ito, O., 1996. Characterization of the organic components of an Alfisol and a Vertisol in adjacent locations in Indian semi-arid tropics using optical spectroscopy, ¹³C NMR spectroscopy, and ¹⁴C dating. *Geoderma* 69, 59–70.
- Aydinalp, C., 2010. Some important properties and classification of vertisols under Mediterranean climate. *African J. Agric. Res.* 5, 449–452. doi:10.5897/AJAR09.376
- Azevedo, P., Bernardo, S., Silva, V.P., 2003. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agric. water Manag.* 58, 241–254.
- Barbiero, L., Kumar, M.S.M., Violette, a., Oliva, P., Braun, J.J., Kumar, C., Furian, S., Babic, M., Riotte, J., Valles, V., 2010. Ferrollysis induced soil transformation by natural drainage in Vertisols of sub-humid South India. *Geoderma* 156, 173–188. doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.014
- Barbiéro, L., Mohamedou, A.O., Roger, L., Furian, S., Aventureur, A., Rémy, J.C., Marlet, S., 2005. The origin of Vertisols and their relationship to Acid Sulfate Soils in the Senegal valley. *Catena* 59, 93–116. doi:10.1016/j.catena.2004.05.007
- Bascomb, C.L., 1968. DISTRIBUTION OF PYROPHOSPHATE-EXTRACTABLE IRON AND ORGANIC CARBON IN SOILS OF VARIOUS GROUPS. *J. Soil Sci.* 19, 251–268.
- Benedetti, M.M., Sparoverk, G., Cooper, M., Curi, N., Carvalhi Filho, a, 2008. Representatividade e potencial de utilização de um banco de dados de solos do Brasil. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32, 2591–2600. doi:10.1590/S0100-06832008000600036
- Benedetti, U.G., do Vale Júnior, J.F., Schaefer, C.E.G.R., Melo, V.F., Uchôa, S.C.P., 2011. Genesis, chemistry and mineralogy of soils derived from Plio-Pleistocene sediments and from volcanic rocks in Roraima - North Amazonia | Gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em ro. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 35, 299–312. doi:10.1590/S0100-06832011000200002
- Benites, V.M., Madari, B., Machado, P.L.O. de A., 2003. Extração e Fracionamento Quantitativo de Substâncias Húmicas do Solo: um Procedimento Simplificado de Baixo Custo. *Rio de Janeiro*.

- BHATTACHARYYA, T., PAL, D.K., DESHPANDE, S.B., 1993. Genesis and transformation of minerals in the formation of red (Alfisols) and black (Inceptisols and Vertisols) soils on Deccan basalt in the Western Ghats, India. *J. Soil Sci.* 44, 159–171. doi:10.1111/j.1365-2389.1993.tb00442.x
- Bi, S., Wang, C., Cao, Q., Zhang, C., 2004. Studies on the mechanism of hydrolysis and polymerization of aluminum salts in aqueous solution: correlations between the “Core-links” model and “Cage-like” Keggin-Al13 model. *Coord. Chem. Rev.* 248, 441–455. doi:10.1016/j.ccr.2003.11.001
- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., Brown, A.J., 2008. Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: Smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. *Clay Miner.* 43, 35–54. doi:10.1180/claymin.2008.043.1.03
- Blokhuys, W.A., Kooistra, M.J., Wilding, L.P., 1990. Soil Micro-Morphology: A Basic and Applied Science, Proceedings of the VIIIth International Working Meeting of Soil Micromorphology, Developments in Soil Science, Developments in Soil Science. Elsevier. doi:10.1016/S0166-2481(08)70323-4
- Bodart, P.R., Delmotte, L., Rigolet, S., Brendlé, J., Gougeon, R.D., 2018. $^7\text{Li}\{^{19}\text{F}\}$ TEDOR NMR to observe the lithium migration in heated montmorillonite. *Appl. Clay Sci.* 157, 204–211. doi:10.1016/j.clay.2018.03.007
- Borchardt, G., 1989. Smectites, in: Dixon, J.B. (Ed.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 675–727.
- Bouna, L., Rhouta, B., Daoudi, L., Maury, F., Amjoud, M., Senocq, F., Lafont, M.C., Jada, A., Aghzzaf, A.A., 2012. Mineralogical and Physico-Chemical Characterizations of Ferruginous Beidellite-Rich Clay from Agadir Basin (Morocco). *Clays Clay Miner.* 60, 278–290. doi:10.1346/CCMN.2012.0600305
- Boutton, T.W., 1991. Stable Carbon Isotope Ratios of Natural Materials: II. Atmospheric, Terrestrial, Marine, and Freshwater Environments, in: *Carbon Isotope Techniques*. Academic Press, Inc, pp. 173–185.
- Boutton, T.W., Archer, S.R., Midwood, A.J., Zitzer, S.F., Bol, R., 1998. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. *Geoderma* 82, 5–41. doi:10.1016/S0016-7061(97)00095-5
- Breuer, J., Murad, E., 1992. Mineralogy of soil kaolinites from Cameroon. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkd.* 155, 379–383. doi:10.1002/jpln.19921550506
- Brown, G., Brindley, G.W., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. Mineralogical Society, London.
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniell, P.A., 2011. *Soil Genesis and Classification*, 6^a ed.
- Chittamart, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Gilkes, R.J., 2010. The pedo-geochemistry of Vertisols under tropical savanna climate. *Geoderma* 159, 304–316. doi:10.1016/j.geoderma.2010.08.004
- Chittamart, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Gilkes, R.J., 2010. Layer-Charge Characteristics of Smectite in Thai Vertisols. *Clays Clay Miner.* 58, 247–262. doi:10.1346/CCMN.2010.0580209
- Chukanov, N.V., 2014. *Infrared spectra of mineral species*, 1st ed. Springer. doi:10.1007/978-94-007-7128-4
- Churchman, G.J., Lowe, M.E., 2012. Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils, in: Hunag, P.M., Li, Y., Sumner, M.E. (Eds.), *Handbook of Soil Sciences*. Taylor and Francis, pp. 20.1–20.72.
- Clemente, C.A., Marconi, A., 1994. Mineralogia e mobilidade de cations de uma alteração intempérica de diabásio. *Sci. Agric.* 51, 335–344. doi:10.1590/S0103-90161994000200021
- Clymans, W., Struyf, E., Govers, G., Vandevenne, F., Conley, D.J., 2011. Anthropogenic impact on amorphous silica pools in temperate soils. *Biogeosciences* 8, 2281–2293. doi:10.5194/bg-8-2281-2011
- Coulombe, C.E., Dixon, J.B., Wilding, L.P., 1996. Vertisols and Technologies for their Management, Developments

- in Soil Science, Developments in Soil Science. Elsevier. doi:10.1016/S0166-2481(96)80007-9
- Cuadros, J., 2012. Clay crystal-chemical adaptability and transformation mechanisms. *Clay Miner.* 47, 147–164. doi:10.1180/claymin.2012.047.2.01
- Cuadros, J., Dudek, T., 2006. FTIR investigation of the evolution of the octahedral sheet of kaolinite-smectite with progressive kaolinization. *Clays Clay Miner.* 54, 1–11. doi:10.1346/CCMN.2006.0540101
- Cuadros, J., Nieto, F., Wing-Dudek, T., 2009. Crystal-chemical changes of mixed-layer kaolinite-smectite with progressive kaolinization, as investigated by TEM-AEM and HRTEM. *Clays Clay Miner.* 57, 742–750. doi:10.1346/CCMN.2009.0570607
- Cunha, G.O. de M., Almeida, J.A. de, Barboza, B.B., 2014. Relação entre o alumínio extraível com KCl e oxalato de amônio e a mineralogia da fração argila, em solos ácidos brasileiros. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 1387–1401. doi:10.1590/S0100-06832014000500004
- Cunha, G.O. de M., Almeida, J.A. de, Testoni, S.A., Barboza, B.B., 2015. Formas de Alumínio em Solos Ácidos Brasileiros com Teores Excepcionalmente Altos de Al³⁺ Extraível com KCl. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 39, 1362–1377. doi:10.1590/01000683rbc20150017
- Cunha, T.J.R., Ribeiro, L.P., Santos, H.G., Gomes, I.A., Santos, R.D., 2000. Estudo de correlação de solos para fins de classificação nas regiões do Recôncavo Baiano e microrregião de Irecê, Bahia. Rio de Janeiro.
- Dalibor, J., Sijakova-Ivanova, T.T., Biljana, P., Jovanov, D., Sijakova-Ivanova, T.T., Petkovska, B., 2012. X-Ray Diffraction and Mineralogical Study of Vertisol in Eastern Macedonia. *IIOAB J.* 3, 26–30.
- Dasog, G.S., Acton, D.F., Mermut, A.R., De Jong, E., 1988. Shrink-swell potential and cracking in clay soils of Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 68, 251–260.
- Demattê, J.A.M., Noronha, N.C., Clemente, C.A., Marconi, A., Oviedo, A.F.P., 1999. REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE DIABÁSIO E ARGILITO DA REGIÃO DE PIRACICABA-SP E DE RIOLITO DA REGIÃO DE PALMAS-PR. *Sci. Agric.* 56, 273–283. doi:10.1590/S0103-90161999000200003
- Deng, Y., G.N.W.J.B.D., 2013. Soil Mineralogy Laboratory Manual, 14^a ed. by the authors, Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University, Texas.
- Dhillon, G.S., Gillespie, A., Peak, D., Van Rees, K.C.J., 2017. Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems. *Geoderma* 298, 1–13. doi:10.1016/j.geoderma.2017.03.016
- Dias, A.C.C., Demttê, J.L., 1977. Mineralogia de alguns solos da bacia sedimentar do Recôncavo Baiano.
- Djordjevic, A., Golubovic, S., Tomic, Z., Aleksic, V., Natasa, Nikolic, J., Jovanovic, O., 2012. The origin of montmorillonite in vertisols from the Southern Serbian Peinja District. *African J. Agric. Res.* 7, 3034–3044.
- Donagemma, G.K., Viana, J.H.M., Almeida, B.G. de, Ruiz, H.A., Klein, V.A., Dechen, S.C.F., Fernandes, R.B.A., 2017. *Análise Granulométrica*, 3^a ed.
- Dudal, R., Eswaran, E., 1988. Distribution, properties and classification of Vertisols., in: L.P., WILDING; R, P. (Ed.), *Vertisols: Their Distribution, Properties, Classification and Management*. Texas A&M University Printing Centre, College Station, Texas, pp. 1–22.
- Dudek, T., Cuadros, J., Fiore, S., 2006. Interstratified kaolinite-smectite: Nature of the layers and mechanism of smectite kaolinization. *Am. Mineral.* 91, 159–170.
- EMBRAPA, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos, 3^a ed.
- EMBRAPA, 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 2^a ed. Brasília, DF.
- EMBRAPA, 1980. *Análise dos dados meteorológicos da estação experimental de Mandacaru em Juazeiro, BA.*
- EMBRAPA, 1979. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos da margem direita do Rio São Francisco-

BA.

- Eswaran, H., Beinroth, F.H., Reich, P.F., Quandt, L., 1999. VERTISOLS: Their properties, classification, distribution and management.
- Eswaran, H., Rice, T., Ahrens, R., Bobby, A.S., 2002. Soil Classification A Global Desk Reference. CRC Press, London.
- Fanning, V.C., Keramidas, V.Z., El-Desoky, M.A., 1989. Micas, in: Dixon, J.B.; Weed, S.B.. (Ed.), Minerals in Soil Environments. Madison, pp. 551–634.
- FAO, 2014. IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome.
- Franzmeier, D.P., Ross Jr, S.J., 1968. Soil Swelling: Laboratory measurement and relation to other soil properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 32, 573–577.
- Fredlund, D.G., 1996. Vertisols and Technologies for their Management, in: Developments in Soil Science, Developments in Soil Science. Elsevier, pp. 499–524. doi:10.1016/S0166-2481(96)80016-X
- Gee, G.W., Or, D., 2002. Particle size analysis, in: Dane, J.H.; Topp, G.C.. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 255–293.
- Gonçalves, C.N., Dalmolin, R.S.D., Dick, D.P., Knicker, H., Klamt, E., Kögel-Knabner, I., 2003. The effect of 10% HF treatment on the resolution of CPMAS¹³C NMR spectra and on the quality of organic matter in Ferralsols. Geoderma 116, 373–392. doi:10.1016/S0016-7061(03)00119-8
- Graham, R.C., Schoeneberger, P.J., Breiner, J.M., 2017. Genesis and physical behavior of soils on sandstone and shale in Southern California. Soil Sci. 182, 216–226. doi:10.1097/SS.0000000000000212
- Greene Kelly, R., 1953. The identification of montmorillonitoids in clays. Eur. J. Soil Sci. 233–237.
- Hartley, P.E., Presley, D.R., Ransom, M.D., Hettiarachchi, G.M., West, L.T., 2014. Vertisols and Vertic Properties of Soils of the Cherokee Prairies of Kansas. Soil Sci. Soc. Am. J. 78, 556. doi:10.2136/sssaj2013.06.0217
- Hawkins, W.A., Graham, R.C., 2017. Soil mineralogy of a vernal pool catena in southern California. Soil Sci. Soc. Am. J. 81, 214–223. doi:10.2136/sssaj2016.08.0257
- Heidari, A., Mahmoodi, S., Roozitalab, M.H., Mermut, A.R., 2008. Diversity of clay minerals in the vertisols of three different climatic regions in western Iran. J. Agric. Sci. Technol. 10, 269–284.
- Hua, K., Wang, D., Guo, X., Guo, Z., 2014. Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a vertisol in Huang-Huai-Hai Plain, China. PLoS One 9, e108594. doi:10.1371/journal.pone.0108594
- Jackson, M.L., 1969. Soil Chemical Analysis: Advanced course. University of Wisconsin, Wisconsin, USA.
- Juo, A.S.R., Kamprath, E.J., 1979. Copper Chloride as an Extractant for Estimating the Potentially Reactive Aluminum Pool in Acid Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 35–38.
- Kampf, N., Curi, N., 2003. Argilominerais em solos brasileiros, in: Tópicos Em Ciência Do Solo. pp. 1–54.
- Kamprath, E.J., 1970. Exchangeable Aluminum As a Criterion for Liming Leached Mineral Soils. SOIL SCI. SOC. AMER. PROC 34, 252–254.
- KANTOR, W., SCHWERTMANN, U., 1974. MINERALOGY AND GENESIS OF CLAYS IN RED-BLACK SOIL TOPOSEQUENCES ON BASIC IGNEOUS ROCKS IN KENYA. J. Soil Sci. 25, 67–78. doi:10.1111/j.1365-2389.1974.tb01104.x
- Karathanasis, A.D., 2008. Structural Allocation of Clay Mineral Elemental Components, in: Methods of Soil Analysis. Parte 5. Mineralogical Methods. SSSA Book Series, no.5. Madison, p. 677.

- Khresat, S.A., Rawajfih, Z., 1999. Morphological, chemical, and physical characteristics of shrink-swell soils in a Mediterranean semiarid region. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1291–1298.
- Krull, S.E., Skjemstad, J.O., 2003. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ profiles in ^{14}C -dated Oxisol and Vertisols as a function of soil chemistry and mineralogy. *Geoderma* 112, 1–29.
- Kumar, N., Mukherjee, I., Varghese, E., 2015. Adsorption-desorption of tricyclazole: effect of soil types and organic matter. *Environ. Monit. Assess.* 187, 1. doi:10.1007/s10661-015-4280-5
- Lavkulich, L.M., Wien, J.H., 1970. Comparison of Organic Matter Destruction by Hydrogen Peroxide and Sodium Hypochlorite and Its Effects on Selected Mineral Constituents. *SOIL SCI. SOC. AMER. PROC.* 34, 755–758.
- Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68. doi:10.1038/nature16069
- Lima, G.K., 2014. Caracterização de Vertissolos do Nordeste Brasileiro. Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Madejová, J., Komadel, P., 2001. Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared methods. *Clays Clay Miner.* 49, 410–432.
- Malla, P.B., Douglas, L.A., 1987. Problems in identification of montmorillonite and beidellite. *Clays Clay Miner.*
- Marques, F.A., Souza, R.A. da S., Souza, J.E.S. de, Lima, J.F.W.F., Souza Júnior, V.S. de, 2014. Caracterização de vertissolos da ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 1051–1065. doi:10.1590/S0100-06832014000400002
- Marques, J.J., Teixeira, W.G., Schulze, D.G., Curi, N., 2002. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region. *Clay Miner.* 37, 651–661. doi:10.1180/0009855023740067
- McKeague, J.A., Day, J.H., 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Can. J. Soil Sci.* 46, 13–22.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7, 317–327.
- Michels, L., Fossum, J.O., Rozynek, Z., Hemmen, H., Rustenberg, K., Sobas, P. a., Kalantzopoulos, G.N., Knudsen, K.D., Janek, M., Plivelic, T.S., da Silva, G.J., 2015. Intercalation and Retention of Carbon Dioxide in a Smectite Clay promoted by Interlayer Cations. *Sci. Rep.* 5, 8775. doi:10.1038/srep08775
- Mink, J.K. and J., Horvith, E., Gabor, M., 1993. Intercalation study of clay minerals by Fourier transform infrared spectrometry. *Vib. Spectrosc.* 5, 61–67.
- Mocanu, V., Craciun, C., Eftene, M., Dumitru, S., Cotet, V., 2008. CLAY MINERALOGY INFLUENCE ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF VERTISOLS FROM ROMANIA. *Factori și Procese Pedogenetice din Zo. Temp.* 7 S. nouă 107–112.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, 2^a ed. Oxford Universit Press.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1989. X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals. Oxford.
- Moujahid, Y., Bouabid, R., 2015. Mineralogy and charge of Moroccan vertisols smectite. *J. Mater. Environ. Sci.* 6, 3329–3337.
- Moustakas, N.K., 2012. A study of Vertisol genesis in North Eastern Greece. *Catena* 92, 208–215. doi:10.1016/j.catena.2011.12.011
- Ngole, V.M., Ekosse, G.E., 2008. Physico-chemistry and mineralogy related to productivity of arenosol, luvisol and vertisol. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. A Sci.* 32, 99–108.

- Nguetnkam, J.P., Kanga, R., Villiéras, F., Ekodeck, G.E., Yvon, J., 2007. Pedogenic formation of smectites in a vertisol developed from granitic rock from Kaélé (Cameroon, Central Africa). *Clay Miner.* 42, 487–501. doi:10.1180/claymin.2007.042.4.07
- Nordt, L.C., Driese, S.D., 2010. New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols. *Geology* 38, 407–410. doi:10.1130/G30689.1
- Nordt, L.C., Wilding, L.P., Lynn, W.C., Crawford, C.C., 2004. Vertisol genesis in a humid climate of the coastal plain of Texas, U.S.A. *Geoderma* 122, 83–102. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.020
- Nurjanto, H.H., Supriyo, H., Widyastuti, S.M., Kabirun, S., Johan, E., Matsue, N., 2016. Smectite under heavy clay soils development at FRE wanagama forest area. *Malaysian J. Soil Sci.* 20, 1–18.
- Pai, C.W., Wang, M.K., Wang, W.M., Houn, K.H., 1999. Smectites in iron-rich calcareous soil and black soils of Taiwan. *Clays Clay Miner.* 47, 389–398.
- Pal, D.K., Bhattacharyya, T., Chandran, P., Ray, S.K., Satyavathi, P.L.A., Durge, S.L., Raja, P., Maurya, U.K., 2009. Vertisols (cracking clay soils) in a climosequence of Peninsular India: Evidence for Holocene climate changes. *Quat. Int.* 209, 6–21. doi:10.1016/j.quaint.2008.12.013
- Pal, D.K., Wani, S.P., Sahrawat, K.L., 2012. Vertisols of tropical Indian environments: Pedology and edaphology. *Geoderma* 189–190, 28–49. doi:10.1016/j.geoderma.2012.04.021
- Peech, L., Alexander, L., Dean, L., 1947. Methods of soil analysis for soil fertility investigations, Methods of soil analysis for soil fertility investigations. Washington.
- Raja, P., Bhaskar, B.P., Surendran, U., Rajan, K., Sarkar, S.K., Malpe, D.B., Nagaraju, M.S.S., 2018. Pedogenesis of spatially associated red and black soils in Purna valley from semi-arid region of Central India. *Chem. Geol.* 483, 174–190. doi:10.1016/j.chemgeo.2018.02.018
- Ribeiro, L.P., Volkoff, B., Melfi, A.J., 1990. Evolução mineralógica das argilas em solos vérticos do Recôncavo Baiano. *R. Bras. Ci. Solo* 263–268.
- Righi, D., Terribile, F., Petit, S., 1995. Low-charge to high-charge beidellite conversion in a Vertisol from South Italy. *Clays Clay Miner.* 43, 495–502. doi:10.1346/CCMN.1995.0430414
- Sanderman, J., Farrell, M., Macreadie, P.I., Hayes, M., McGowan, J., Baldock, J., 2017. Is demineralization with dilute hydrofluoric acid a viable method for isolating mineral stabilized soil organic matter? *Geoderma* 304, 4–11. doi:10.1016/j.geoderma.2017.03.002
- Ščančar, J., Milačič, R., 2006. Aluminium speciation in environmental samples: A review. *Anal. Bioanal. Chem.* 386, 999–1012. doi:10.1007/s00216-006-0422-5
- Schaetzl, R., Anderson, S., 2005. *Soils Genesis and Geomorphology*. United States of America by Cambridge University Press, Cambridge.
- Scherer, H.W., Feils, E., Beuters, P., 2014. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium. *Plant, Soil Environ.* 60, 325–331.
- Shamrani, M.A., Mutaz, E., Puppala, A.J., Dafalla, M.A., 2010. Characterization of Problematic Expansive Soils from Mineralogical and Swell Characterization Studies, in: *GeoFlorida 2010*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 793–802. doi:10.1061/41095(365)78
- Shoji, S., 1988. Separation of melanic and fulvic andisols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34, 303–306. doi:10.1080/00380768.1988.10415686
- Shuman, L.M., Duncan, R.R., 1990. Soil Exchangeable Cations and Aluminum Measured by Ammonium Chloride,

- Potassium Chloride, and Ammonium Acetate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21, 1217–1228. doi:10.1080/00103629009368300
- Sotelo-Ruiz, E.D., Gutiérrez-Castorena, M.D.C., Cruz-Bello, G.M., Ortiz-Solorio, C.A., 2013. Physical, chemical, and mineralogical characterization of vertisols to determine their parent material. *Interciencia* 38, 488–495.
- Sposito, G., 2008. Soil Acidity, in: *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, p. 321.
- Stephan, S., Berrier, J., Petre, A.A.D., Jeanson, C., Kooistra, M.J., Scharpenseel, H.W., Schiffmann, H., 1983. Characterization of in Situ Organic Matter Constituents in Vertisols from Argentina, Using Submicroscopic and Cytochemical Methods—First Report, *Developments in Soil Science*. doi:10.1016/S0166-2481(08)70282-4
- Swift, R.S., 1996. Organic matter characterization, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book Series. Madison, pp. 1011–1069.
- Ulery, A.L., Drees, L.R., 2008. *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- USDA, 2014. *Keys to Soil Taxonomy, Agriculture*.
- USDA, 1999. *Soil Taxonomy, Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. doi:10.1017/S0016756800045489
- Usepa, U.S.E.P.A., 1996. Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils. Washington, DC.
- Van Breemen, N., Buurman, P., 1998. *Soil Formation*.
- Wadt, P.G.S., 2002. *Manejo de Solos Ácidos do Estado do Acre*. Rio Branco, AC.
- Wan, Y., Kwong, J., Brandes, H.G., Jones, R.C., 2002. Influence of Amorphous Clay-Size Materials on Soil Plasticity and Shrink-Swell Behavior. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 128, 1026–1031. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1026)
- Wattel-Koekkoek, E.J.W., Van Genuchten, P.P.L., Buurman, P., Van Lagen, B., 2001. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. *Geoderma* 99, 27–49. doi:10.1016/S0016-7061(00)00062-8
- Wilding, L.P., Tessier, D., 1988. *Vertisols: Their distribution, properties, classification and management*. Texas.
- Wilson, M.J., 1994. *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*, 1^a ed. Springer Science+Business Media Dordrecht. doi:10.1007/978-94-011-0727-3
- Yerima, Bp., Wilding, L., Calhoun, F., Hallmark, C., 1987. Volcanic ash-influenced vertisols and associated mollisols of El Salvador: physical, chemical, and morphological properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 699–708. doi:10.2136/sssaj1987.03615995005100030026x

APÊNDICES

APÊNDICE A. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em amostras sem remoção da matéria orgânica (OM) e com remoção da matéria orgânica (Inorg) dos perfis de Vertissolos.

APÊNDICE B.

Descrições morfológicas, análises físicas e químicas e fotos dos perfis e das áreas de coleta.

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico epiirredóxico, textura muito argilosa, A moderado, fase caatinga hiperxerófila, relevo suave ondulado.

LOCALIZAÇÃO: Usina Aliança. Sentido: Salvador -> Feira de Santana (BR 324). Entra-se a direita, numa “bifurcação” situado a poucos metros antes da placa km 560. Percorre-se 2 km, onde é observado um vilarejo (Nazaré do Jacuípe), oposto a este vilarejo, situa-se o ponto que irá para a trincheira. Desse ponto desloca-se 300m e dobra (vira a esquerda ou direita?) deslocando-se mais 600 m, chegando dessa forma no local da trincheira.

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Terra Nova (BA), 12° 29' 99"S 38° 38'216"W (SAD 69); 12° 29' 114"S 38° 38' 227"W (WGS) Garmin Etrex.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL: Descrito e coletado em barranco de estrada, em terço médio de encosta com 7% de declive, sob cana-de-açúcar.

ALTITUDE: 86 m.

LITOLOGIA: Folhelhos com lentes de calcário.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Santo Amaro.

CRONOLOGIA: Cretáceo.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Folhelho verde oliváceo intercalado com calcário.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado e ondulado.

EROSÃO: Laminar ligeira.

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta ombrófila densa.

USO ATUAL: Cana-de-açúcar.

CLIMA: Af, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Marcelo Metri Côrrea, Oldair, Glêvia Kamila.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0-16 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); argilosa; moderada pequena e média, blocos subangulares e moderada pequena e média, granular; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição abrupta e plana.
- ABv** 16-26 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmida); muito argilosa; moderada grande e muito grande prismática; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição abrupta e plana.
- Bivn1** 26-53 cm, coloração variegada, composta de bruno-forte (7,5YR 5/8, úmida), bruno amarelado (10YR 5/6 úmida) e oliva-claro-acinzentado (5Y 6/3 úmida); muito argilosa; moderada muito grande prismática e moderada média e grande blocos angulares; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento forte; extremamente dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.
- Bivn2** 53-71 cm, coloração variegada, composta de bruno amarelado (10YR 5/6, úmida) e cinzento-oliváceo-claro (5Y 6/2 úmida); muito argilosa; fraca muito grande prismática; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento forte; extremamente dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.
- Cvn** 71-100 cm+, coloração variegada, composta de cinzento-oliváceo-claro (5Y 6/2 úmido) e amarelo-oliváceo (5Y 6/8 úmido); muito argilosa; maciça; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento forte; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no horizonte Ap; poucas finas no horizonte ABv; raras finas nos horizontes Bivn1, Bivn2 e Cvn.

OBSERVAÇÕES - Perfil coletado úmido; forte efervescência das pontuações brancas (CaCO_3) presentes na massa do solo com HCl 10%, nos horizontes Bivn2 e Cvn. Fendas verticais estendendo-se até 1m (parou de cavar) com largura de 2,5 cm. Rachaduras na superfície do solo (8 cm).

- Presença de superfície de fricção (slickensides) nos horizontes Bivn1, Bivn2 e Cvn, essas superfícies são encontradas com frequência e em grau bem desenvolvido, são grandes e contínuos. Em raras partes são observados fracos estriamentos.
- Presença de pontuações negras nos horizontes Bivn2 e Cvn.
- O horizonte Cvn apresenta grande quantidade de perfurações muito pequenas (1mm ou menos) semelhantes as encontradas em Porto Calvo – Alagoas.
- Quanto mais próximo a superfície, as superfícies de fricção apresentam ângulos menores de inclinação.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Composição Granulométrica da TFSA				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Densidade		Porosidade ₁₀₅
Símbolo	Prof.	Areia Grossa (2-0,21mm)	Areia Fina (0,021-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Solo ₁₀₅	Partícula	
(cm)		g.kg ⁻¹				%		g cm ⁻³		%
Ap	0-16cm	159	114	199	528	323	39	1,61	2,67	39
ABv	16-26cm	57	56	239	648	359	45	1,82	2,76	34
Bivn1	26-53cm	5	6	224	765	350	54	1,77	2,85	38
Bivn2	53-71cm	3	6	222	769	128	83	1,84	2,83	35
Cvn	71-100cm+	4	7	170	819	304	63	1,83	2,87	36

^{1/} Argila dispersa em água; ^{2/} Grau de flocculação

pH (1:2,5)		BASES TROCÁVEIS				SOMA BASES	Al ³⁺	H+Al	CTC	V	m	P	PST
Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺								
cmolc kg ⁻¹						%		mg kg ⁻¹		%		%	
5,43	4,50	14,95	8,86	0,58	0,42	24,81	0,05	6,60	31,41	79,00	0,20	2,55	1,69
5,59	4,55	18,39	11,03	0,29	0,70	30,41	0,10	6,98	37,39	81,33	0,33	0,57	2,30
4,53	3,65	18,57	12,58	0,31	2,07	33,53	7,73	18,67	52,20	64,23	18,73	0,43	6,17
4,60	3,71	23,18	16,35	0,42	3,45	43,40	3,35	11,19	54,59	79,50	7,17	0,32	7,95
7,20	6,25	25,18	21,96	0,23	4,54	51,91	0	1,68	53,59	96,87	0,00	28,48	8,75

DIGESTÃO SULFÚRICA (H ₂ SO ₄ 1:1)						SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Carbono Orgânico	Equivalente de CaCO ₃
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅				
dag kg ⁻¹						Ki	Kr	g.kg ⁻¹	
23,8	10,097	7,183	0,351	1,144	0,043	4,01	2,76	13,24	3,75
-	-	-	-	-	-	-	-	12,33	4,38
34,4	15,651	9,354	0,226	1,462	0,024	3,74	2,71	8,32	4,00
-	-	-	-	-	-	-	-	5,21	4,25
36,0	15,651	8,802	0,341	1,399	0,043	3,91	2,88	4,67	5,31

VERTISSOLO HÁPLICO Órtico solódico epirredóxico

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico, textura muito argilosa, A moderado, fase caatinga hiperxerófila, relevo plano.

LOCALIZAÇÃO: Estação experimental de Mandacaru (EEMI)- Embrapa semiárido. Sentido Juazeiro -> (EEMI) - Embrapa semiárido. Da primeira entrada da (EEMI) para a estrada distancia-se 1,4 km. Dessa estrada à segunda entrada da (EEMI) percorre-se 700m, existe uma ponte a poucos metros da segunda entrada da (EEMI).

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Juazeiro (BA), 9° 23' 32,1"S 40° 24' 47,2"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira situada em área plana, com declive de 0-2,5%, sob área de bordadura de plantio experimental de manga (banco de germoplasma).

ALTITUDE: 386 m.

LITOLOGIA: Calcário Caatinga.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Caatinga.

CRONOLOGIA: Terciário/Quaternário.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Produto de alteração de calcário.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

RELEVO LOCAL: Plano

RELEVO REGIONAL: Plano.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Caatinga hiperxerófila arbóreo arbustiva pouco densa.

USO ATUAL: Manga (*Mangifera indica* L.) irrigada.

CLIMA: BSw^h, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Marcelo Metri Côrrea, Flávio Marques, Glêvia Kamila.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0-6 cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4/4, úmida); argila; moderada média granular; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.
- BAv** 6-28 cm, bruno-oliváceo (2,5Y 4/4, úmida); muito argilosa; moderada grande e muito grande prismática e moderada grande e muito grande blocos angulares; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.
- Biv1** 28-62 cm, bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/4, úmida); muito argilosa; moderada grande e muito grande prismática e moderada grande e muito grande blocos angulares; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento moderado; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição gradual e plana.
- Biv2** 62-88 cm, bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/4, úmida); muito argilosa; moderada muito grande prismática e fraca muito grande blocos angulares; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento moderado; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição difusa e plana.
- Biv3** 88-100 cm+, bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/4, úmida); muito argilosa; moderada muito grande prismática e fraca muito grande blocos angulares; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento moderado; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas e médias no horizonte Ap; comuns finas e médias no Biv1; poucas médias no Biv2; raras médias no Biv3 e Biv4.

OBSERVAÇÕES - Perfil coletado seco; presença de pontuações brancas (CaCO_3) (1-2 mm), reagindo fortemente com HCl 10%, presentes nos horizontes BAv, Biv1, Biv2, Biv4. Fendas verticais da superfície até 1,2 m com largura variando de 0,3 a 1 cm. Rachaduras na superfície (15 cm).

- Superfícies de fricção (S.F., slickensides) em grau moderado e em poucas quantidades no horizonte Biv1; (S.F.) em grau moderado e em grandes quantidades nos horizontes Biv1 e Biv2, pequenos e mais individualizados.
- Presença de seixos quartzosos esféricos e subesféricos na massa dos horizontes Biv1, Biv2 e Biv3, em quantidades raras e tamanho variando de 0,5 a 3 cm.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Composição Granulométrica da TFSA				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Densidade		Porosidade ₁₀₅
Símbolo	Prof.	Areia Grossa (2-0,21 mm)	Areia Fina (0,21-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002mm)			Solo ₁₀₅	Partícula	
	(cm)	g.kg ⁻¹					--- % ---	g cm ⁻³		----- % -----
Ap	0-6cm	100	151	157	592	302	49	-	2,61	-
BAv	6-28cm	78	105	139	678	345	49	1,65	2,78	41
Biv1	28-62cm	74	103	125	698	323	54	1,57	2,70	42
Biv2	62-88cm	72	100	136	692	343	50	1,58	2,78	43
Biv3	88-100cm+	58	92	115	735	342	53	1,60	2,72	41

^{1/} Argila dispersa em água; ^{2/} Grau de flocculação

pH (1:2,5)		BASES TROCÁVEIS				SOMA BASES	Al ³⁺	H+Al	CTC	V	m	P	PST
Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺								
cmolc kg ⁻¹										----- % -----		mg kg ⁻¹	--- % ---
7,60	6,73	21,33	3,15	1,38	0,37	26,23	0	1,13	27,36	95,86	0	42,90	1,41
7,80	6,80	18,99	3,26	0,38	0,60	23,23	0	0,26	23,49	98,87	0	0,93	2,58
7,83	7,00	20,24	3,02	0,11	0,46	23,83	0	0,35	24,18	98,55	0	0,85	1,93
7,98	7,08	23,06	2,97	0,15	0,76	26,94	0	0,27	27,21	99,02	0	0,83	2,82
7,89	7,05	22,20	3,04	0,12	1,30	26,66	0	0,09	26,75	99,67	0	0,96	4,88

DIGESTÃO SULFÚRICA (H ₂ SO ₄ 1:1)						SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Carbono Orgânico	Equivalente de CaCO ₃
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅				
dag kg ⁻¹						Ki	Kr	g.kg ⁻¹	
23,9	15,043	4,474	0,230	1,436	0,042	2,70	2,27	13,84	3,88
-	-	-	-	-	-	-	-	5,45	4,00
22,6	18,102	5,130	0,240	1,653	0,003	2,12	1,80	3,88	4,19
-	-	-	-	-	-	-	-	3,10	4,00
27,4	18,357	5,225	0,259	1,687	0,0007	2,54	2,15	2,85	4,63

VERTISSOLO HÁPLICO Órtco típico

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO: VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico, textura argilosa, A moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano.

LOCALIZAÇÃO: Lado esquerdo da BR 423 sentido Cachoeirinha – Lajedo.

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Cachoeirinha (PE), 08°29'53"S e 36°14'25"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA SOBRE O PERFIL: Trincheira situada em relevo plano com 0-2,5% de declividade, em área cultivada com palma forrageira.

ALTITUDE: 500 m.

LITOLOGIA: Anfibólio quartzo sienito.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Suítes intrusiva leucocrática peraluminosa e shoshonítica Salgueiro/Terra Nova.

CRONOLOGIA: Pré-Cambriano.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Produto de alteração das rochas supracitadas.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Plano.

RELEVO REGIONAL: Plano.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Caatinga hipoxerófila (juazeiro, caatingueira, mandacaru, velame, mufumbo, algodão de seda, algodão mocó, jurema preta, pereiro, cássia sp. e várias gramíneas nativas).

USO ATUAL: Pastagem com palma forrageira.

CLIMA: BShs' da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: P. K. T. Jacomine, M. M. Corrêa, F. A. Marques e J. F. W. F. de Lima.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0-8 cm; cinzento muito escuro (10YR 3/1,5, úmida); argila; forte pequena a média granular, e moderada a forte pequena e média blocos subangulares; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.
- BAv** 8-20 cm; bruno acinzentado escuro (10YR 3/2, úmida); argila; moderada, média prismática; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento moderado; extremamente dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.
- Biv** 20-68 cm; bruno acinzentado escuro (10YR 3/2, úmida); argila; forte grande prismática; slickensides nítidos e em grau de desenvolvimento moderado; dura, firme/friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.
- C** 68-120cm; bruno acinzentado escuro (2,5Y 4/3, úmida); (média) franco; maciça pouco coesa; firme; cerosidade fraca e pouca; ligeiramente plástica e pegajosa; transição clara e irregular.
- Cr** 120-125cm+; bruno-escuro (10YR 4/3, úmida); (média) francoarenosa; maciça; ligeiramente dura com partes macias, muito friável, não plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Comuns finas até 1 cm no Ap e poucas penetrando principalmente pelas fendas, e muito finas (2-1 mm) no interior da estrutura prismática no BAv e Biv. Raras no topo da camada C com distribuição horizontal e uma raiz principal com diâmetro de 3 cm.

OBSERVAÇÕES - Presença de pontuações esbranquiçadas na camada C (68-120 cm) que tem reação forte ao HCl.

- Presença de fendas de 2 a 4 cm e muitas cavidades de 15 a 20 cm de diâmetro.
- Presença de fragmentos de quartzo leitoso arestados (2 a 10 cm) nos horizontes Ap, BAv e Biv, provavelmente oriundos de veios da rocha.
- Presença de 2 calhaus de quartzo leitoso arestados dentro do saprolito (Cr) a 1,20 cm de profundidade, com dimensões de 10 x 15 cm e 12 x 24 cm, remanescentes dos veios após a alteração da rocha.
- Presença de 7 “slickensides”, sendo 5 moderados e grandes pouco inclinados e 2 com maior inclinação, porém todos pouco estriados com superfície ligeiramente irregular (desníveis de 2 a 5 mm, na junção dos pequenos “slickensides” que compõem os grandes “slickensides”, que atingem superfície de 35 x 35 cm).
- Estrutura prismática de 43 cm de comprimento por 16 cm (média) de largura.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Composição Granulométrica da TFSA				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Densidade		Porosidade ₁₀₅
Símbolo	Prof.	Areia Grossa (2-0,21 mm)	Areia Fina (0,21-0,05mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Solo ₁₀₅	Partícula	
(cm)		g.kg ⁻¹					-- % --	g cm ⁻³		%
Ap	0-8cm	124	134	242	500	300	40	1,67	2,67	37
BAv	8-20cm	129	128	247	496	297	40	1,77	2,78	36
Bv	20-68cm	113	130	310	447	311	30	-	2,82	-
C	68-120cm	240	255	282	223	161	28	1,47	2,82	48
Cr	120-125cm+	432	240	146	182	118	35	-	2,82	-

^{1/} Argila dispersa em água; ^{2/} Grau de flocculação

pH (1:2,5)		BASES TROCÁVEIS				SOMA BASES	Al ³⁺	H+Al	CTC	V	m	P	PST
Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺								
cmolc kg ⁻¹										%		mg kg ⁻¹	%
5,96	4,79	16,32	18,16	0,35	0,37	35,20	0	5,20	40,40	87,13	0	133,69	1,05
6,48	4,83	16,64	19,10	0,13	0,66	36,53	0	2,53	39,06	93,52	0	108,63	1,81
7,42	5,45	18,47	23,74	0,18	1,74	44,13	0	1,19	45,32	97,38	0	286,34	3,94
8,37	6,44	19,73	26,42	0,09	2,32	48,56	0	0,36	48,92	99,26	0	636,52	4,78
8,79	6,87	15,34	20,34	0,11	1,54	37,33	0	0,00	37,33	100,00	0	684,96	4,13

DIGESTÃO SULFÚRICA (H ₂ SO ₄ 1:1)						SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Carbono Orgânico	Equivalente de
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅				CaCO ₃
dag kg ⁻¹						Ki	Kr	g.kg ⁻¹	
16,63	4,208	5,111	0,258	1,429	0,106	6,46	3,74	17,75	3,88
-	-	-	-	-	-	-	-	5,48	4,31
20,05	5,198	5,763	0,272	1,502	0,152	6,56	3,84	5,20	5,94
-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	8,00
17,15	2,970	7,712	0,247	1,631	0,967	9,82	3,70	0,78	8,50

VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO: Margem direita do caminho para adutora da Esalq/USP.

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Piracicaba (SP).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira no terço médio de encosta, com declive de cerca de 3%, sob pastagem.

ALTITUDE:

LITOLOGIA: Diabásio.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Serra Geral.

CRONOLOGIA:

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos de diabásio ou alteração do diabásio in situ.

PEDREGOSIDADE: Ligeiramente pedregosa.

ROCHOSIDADE: Ligeiramente rochosa.

RELEVO LOCAL: Ondulado.

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta ombrófila densa.

USO ATUAL: Pastagem.

CLIMA: Cfa, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Glêvia Kamila.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A** 0-16 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); francoargilosa; forte muito pequena e média blocos subangulares; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e clara.
- AB** 16-26 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); francoargilosa; forte média e grande blocos subangulares; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e clara.
- Bv1** 26-52 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); francoargilosa; forte grande e muito grande blocos subangulares; slickensides moderados e comum; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Bv2** 52-82 cm, cinza escuro (10YR 4/1, úmida); muito argilosa; forte grande blocos subangulares; slickensides moderados e abundante; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
- C** 82-145 cm, bruno amarelado (10YR 5/6, úmida); argila; maciça, muito plástica e pegajosa.
- Cr** 145 cm+, bruno forte (7,5YR 5/8, úmida); argila, maciça; muito plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas e médias no horizonte A; comuns finas e médias no AB; comuns finas no Bv1; raras finas no Bv2.

OBSERVAÇÕES - Perfil coletado úmido. Fendas profundas, da superfície até o final do horizonte Bv2 (comprimento/extensão), com largura variando de 0,5 a 1 cm, podendo chegar a 2 cm.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Composição Granulométrica da TFSA				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Densidade		Porosidade ₁₀₅
Símbolo	Prof.	Areia Grossa (2-0,21mm)	Areia Fina (0,021-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Solo ₁₀₅	Partícula	
	(cm)	g.kg ⁻¹					%	g cm ⁻³		%
A	0-16	133	198	277	392	124	68	1,40	2,70	-
AB	16-26	140	201	270	388	152	61	1,53	2,76	-
BV1	26-52	144	212	267	377	173	54	1,61	2,76	-
Bv2	52-82	58	110	219	613	354	42	1,56	2,90	-
C	82-145	26	134	283	557	293	47	1,50	2,99	-
Cr	145 cm+	114	213	269	404	175	57	1,45	3,04	-

^{1/}Argila dispersa em água; ^{2/} Grau de flocculação

pH (1:2,5)		BASES TROCÁVEIS				SOMA BASES	Al ³⁺	H+Al	CTC	V	m	P	Carbono orgânico	Equivalente de CaCO ₃
Água	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺									
		cmolc kg ⁻¹								%		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	
6,0	5,0	11,7	5,1	0,72	0,12	17,6	0	3,7	21,3	83	0	6,5	32,47	-
6,1	5,0	12,4	4,3	0,37	0,20	17,4	0	3,2	20,5	85	0	4,5	21,51	-
6,2	4,9	11,6	3,3	0,21	0,29	15,4	0	3,1	18,5	83	0	2,8	17,02	-
5,6	4,4	17,8	6,5	0,13	0,42	24,8	0	3,4	28,2	88	0	1,1	8,45	-
5,2	4,0	17,4	7,6	0,08	0,40	25,5	0	2,9	28,4	90	0	0,2	3,71	-
6,1	4,3	16,7	8,3	0,08	0,34	25,4	0	1,7	27,1	94	0	-	2,98	-

Rachaduras e *Slickensides*

Posição na paisagem

VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico
Município: Piracicaba-SP

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO: Margem direita da estrada municipal de Chão, sentido Uruguai.

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Candiota (RS), 22J 0230926 e 6483406. Unidade de mapeamento: Aceguá.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira no terço inferior de encosta, com declive de cerca de 5%, sob campo nativo.

ALTITUDE: 189 m.

LITOLOGIA: Folhelho com carbonatos e lentes de arenito.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Irati.

CRONOLOGIA: Permiano.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Folhelho com carbonatos e lentes de arenito.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Campo nativo, bioma Pampa.

USO ATUAL: Campo nativo próximo a plantação de Eucalipto.

CLIMA: Cfb, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Glêvia Kamila e Luiz Fernando Spinelli Pinto.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A** 0-14 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); argilossiltosa; forte pequena blocos subangulares; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e gradual.
- AB** 14-27 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); argila; forte média e grande blocos subangulares; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e gradual.
- Bv1** 27-47 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); argila; forte grande e muito grande blocos subangulares; slickensides moderados e comum; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- Bv2** 47-57 cm, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); argila; forte grande e muito grande prismática que se desfaz em blocos angulares a subangulares; slickensides moderados e comum; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- BC** 57-87 cm+, cinza muito escuro (10YR 3/1, úmida); muito argilosa; maciça, mas tem slickensides; slickensides moderados e abundante; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.

RAÍZES - Muitas finas e médias no horizonte A; comuns finas e médias no AB; comuns finas no Bv1 e Bv2; raras finas no BC.

OBSERVAÇÕES - Perfil coletado úmido. Fendas profundas, da superfície até o horizonte BC (comprimento/extensão), com largura variando de 0,5 a 1 cm.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Composição Granulométrica da TFSA					ADA ^{/1}	GF ^{/2}	Densidade	Porosidade
Prof.	Areia Grossa (2-0,21mm)	Areia Fina (0,021-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Solo ₁₀₅	Partícula
(cm)	g.kg ⁻¹				--- % ---		g cm ⁻³	
0-14	17	137	399	447	125	72	1,20	2,47
14-27	6	138	385	472	167	65	1,39	2,50
27-47	6	68	387	539	240	55	1,44	2,53
47-57	3	62	357	579	272	53	1,35	2,62
57-87 cm+	3	52	278	668	346	48	1,53	2,74
	42	38	326	594	240	60	1,55	2,78

dispersa em água; ^{2/} Grau de floculação

[illegible]

VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico
Município: Candiota-RS
UM: Aceguá

Slickensides

Posição na paisagem

A - DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: VERTISSOLO EBÂNICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO: Margem direita da estrada Santana do Livramento -> Quaraí.

MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Santana do Livramento (RS), zona 21J UTM; 615510 longitude e 660940 latitude. Unidade de mapeamento: Escobar.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira situada em área plana depressional próximo a um curso de água, com declive de 0-3%, sob campo nativo.

ALTITUDE: 261 m.

LITOLOGIA: Basalto.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Serra Geral.

CRONOLOGIA:

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos do basalto ou alteração in situ do basalto.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

RELEVO LOCAL: Plano (depressional).

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Campo nativo, bioma Pampa.

USO ATUAL: Campo nativo.

CLIMA: Cfb, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Glêvia Kamila e Luiz Fernando Spinelli Pinto.

B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A** 0-14 cm, preto (10YR 2/1, úmida); argila; forte muito pequena e pequena blocos subangulares a angulares; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e gradual.
- AB** 14-30 cm, preto (10YR 2/1, úmida); argila; forte pequena e média blocos subangulares a angulares; muito dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição plana e difusa.
- Bv1** 30-57 cm, preto (10YR 2/1, úmida); muito argilosa; forte média e grande prismática que se desfaz em blocos angulares; slickensides moderados e comum; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
- Bv2** 57-94 cm, preto (10YR 2/1, úmida); muito argilosa; forte grande e muito grande prismática que se desfaz em blocos angulares; slickensides moderados e comum; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- BC** 94-110 cm, preto (10YR 2/1, úmida); muito argilosa; forte média blocos subangulares a angulares; slickensides moderados e abundantes; extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- Cv** 110-195cm, preto (10YR 2/1); muito argilosa; maciça.
- Cr** 195cm+, bruno avermelhado (2,5YR 4/4), franco-argiloarenosa, maciça.

RAÍZES - Muitas finas e médias no horizonte A; comuns finas e médias no AB; comuns finas no Bv1 e Bv2; raras finas no BC.

OBSERVAÇÕES - Perfil coletado úmido. Fendas profundas, da superfície até o horizonte BC (comprimento/extensão), com largura variando de 0,5 a 1 cm. As rachaduras tem disposição horizontal e vertical em proporções similares, de padrão reticulado.

C – ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Horizonte		Composição Granulométrica da TFSA				ADA ¹	GF ²	Densidade	Porosidade ₁₀₅	
Símbolo	Prof.	Areia Grossa (2-0,21mm)	Areia Fina (0,021-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Solo ₁₀₅	Partícula	
	(cm)			g.kg ⁻¹			%	g cm ⁻³		%
A	0-14	16	41	380	563	195	65	1,22	2,22	-
AB	14-30	5	40	383	572	251	56	1,40	2,53	-
BV1	30-57	16	26	330	628	312	50	1,53	2,55	-
Bv2	57-94	3	9	295	693	375	46	1,53	2,58	-
BC	94-110	30	37	208	725	396	45	1,53	2,75	-
Cv	110-195	42	42	214	702	400	43	1,56	2,82	-
Cr	195 cm+	440	55	162	344	192	44	1,29	2,86	-

^{1/} Argila dispersa em água; ^{2/} Grau de floculação

[illegible]

VERTISSOLO EBÂNICO Órtico Típico
Município: Santana do Livramento-RS
UM: Escobar

Slickensides

Autogranulação