

AGNALDO ROBERTO DE JESUS FREITAS

**GEOAMBIENTES: SOLOS E ÁREAS DE MINERAÇÃO DE OURO NA REGIÃO
NORTE DO SURINAMÉ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Márcio Rocha Francelino

Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes Filho
Carlos E. G. Reynaud Schaefer

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F866g
2023 Freitas, Agnaldo Roberto de Jesus, 1985-
Geoambientes: solos e áreas de mineração de ouro na região
norte do Suriname / Agnaldo Roberto de Jesus Freitas. – Viçosa,
MG, 2023.

1 tese eletrônica (97 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.103>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Classificação. 2. Solos - Poluição - Suriname.
3. Desmatamento - Suriname. 4. Minas e recursos minerais -
Suriname. 5. Aprendizado do computador. 6. Sensoriamento
remoto. I. Francelino, Márcio Rocha, 1966-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.44

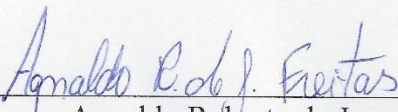
AGNALDO ROBERTO DE JESUS FREITAS

**GEOAMBIENTES: SOLOS E ÁREAS DE MINERAÇÃO DE OURO NA REGIÃO
NORTE DO SURINAME**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2023.

Assentimento:



Agnaldo Roberto de Jesus Freitas
Autor



Márcio Rocha Francelino
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Antônio Cipriano de Freitas e Maria de Fátima Freitas, minha irmã Claudia, minha namorada Libia e a toda minha família pelo amor, apoio, incentivo, confiança dedicados a mim durante este e todos outros momentos da minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, e ao Departamento de Solos pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao meu orientador, professor Márcio Rocha Francelino, e aos coorientadores, professores João Luiz Lani, Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer pela valiosa atenção, paciência orientação durante execução deste trabalho, o qual contribuiu para meu amadurecimento e formação profissional.

Aos colegas e amigos do DPS, pela ajuda e amizade durante o período de convivência nos Departamentos.

Aos funcionários do Departamento de Solos, pela colaboração na realização das análises de solos em especial, ao José Maurício, da Mineralogia.

Ao NEPUT, pelo apoio e amizade dos funcionários Pedro e especialmente ao Professor João Luiz Lani, pelos conselhos e ensinamentos, que serão levados para toda a vida.

Enfim, agradeço a todos, que fizeram parte da minha vida e de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.

A Agência Brasileira de Cooperação/Ministério das Relações Exteriores pelo apoio e financiamentos das viagens e realização das análises de solos e assim como a cooperação com o Governo do Suriname.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

FREITAS, Agnaldo Roberto de Jesus, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Geoambientes: solos e áreas de mineração de ouro na região norte do Suriname.** Orientador: Márcio Rocha Francelino. Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

O Suriname, localiza-se na costa norte do continente sul-americano, no Planalto das Guianas é um dos países com maior cobertura florestal proporcional do mundo. No entanto, houve nestes últimos anos, aumento crescente no desmatamento, principalmente nas áreas de mineração de ouro, causando grandes impactos ambientais, principalmente nos solos e corpos hídricos destas áreas. Os solos deste país foram pouco estudados onde os estudos ocorreram quando o país era colônia neerlandesa, quando foi desenvolvido o Sistema Surinamês de Classificação de Solos (SiSCS), que se baseado no sistema holandês e americano (*Soil Taxonomy*). Devido a semelhança ambiental e proximidade geográfica o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) poderia ser útil para transferência de conhecimentos pedológicos. Dessa forma, este trabalho, teve como objetivos: interpretar e correlacionar os solos da região norte do Suriname com o SiBCS e WRB e servir como base para elaboração de projetos para o planejamento do uso da Terra. Além disso propor um método de classificação utilizando as técnicas de análise de imagens baseada em objetos (OBIA) com técnicas de aprendizado de máquina (AM) para classificar e caracterizar as áreas alteradas pela mineração de ouro no Suriname. Foram coletadas amostras de solos em diversos pontos para reconhecimento e correlação com as classes de solos. Análises físicas, químicas e mineralógicas foram realizadas para caracterização das propriedades dos solos. Foram gerados mapas de solos do Suriname utilizando os sistemas SiBCS e WRB. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 (2001 e 2008), Landsat 8 (2014) e do Sentinel-2A (2020), para análise temporal das alterações de uso e cobertura das áreas de mineração de ouro. Foi observado que na Planície Costeira Jovem predominam os Gleissolos (Gleysols), seguidos pelos Organossolos Háplicos (Folic Histosols) com formação de turfeiras. Nesse ambiente, em menor quantidade, ocorrem os Neossolos Quartzarênicos (Arenosols). Na Planície Costeira Antiga predominam os Plintossolos (Plinthosols) e os Argissolos (Acrisols). Na Cobertura Savânica ocorrem os Espodossolos (Podzols) e os Neossolos Quartzarênicos (Arenosols). Nas Terras Altas predominam os solos mais desenvolvidos e distróficos os Latossolos (Ferrasols), Argissolos (Acrisol) e Plintossolos (Plinthosols), moderadamente desenvolvidos como os Neossolos Flúvicos (Flúvisols), e os mais jovens Neossolos Litólicos (Leptosols) e Cambissolos Háplicos (Cambisols). Entre 2001

e 2008 a área da mineração aumentou 100%, explorando as partes médias da bacia com mineração hidráulica. No período de 2008 a 2014 a área de mineração triplicou, evoluindo para partes baixas e altas da bacia do rio Maurouni com início da escavação mecânica. Entre 2014 e 2020 o aumento foi de 27%, sendo que 97% por escavação mecânica, principalmente na cabeceira da bacia do rio Maurouni, aumentando o potencial de contaminação desta bacia. O SiBCS pode ser utilizado no Suriname de forma a contribuir para transferência de conhecimentos pedológicos para melhor planejamento do uso da Terra e dos recursos naturais no país. O método proposto de classificação de áreas de mineração possui grande potencial para classificar e caracterizar áreas de mineração de ouro, oferecendo melhor análise e monitoramento do impacto ambiental nas áreas de mineração por escavação e hidráulica.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental. Planejamento do uso da terra. Poluição ambiental. Machine learning. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

FREITAS, Agnaldo Roberto de Jesus, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Geoenvironments: soils and gold mining areas in the northern region of Suriname.** Adviser: Márcio Rocha Francelino. Co-advisers: Elpídio Inácio Fernandes Filho and Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

Suriname is located on the north coast of the South American continent, on the Guiana plateau and is one of the countries with the highest proportional forest cover in the world. However, in recent years, there has been an increasing the deforestation, mainly in gold mining areas, causing major environmental impacts, mainly on soils and water bodies. The soils of this country were little studied and only occurred when it was a Dutch colony, when the Surinamese Soil Classification System (SiSCS) was developed, which was based on the Dutch and American system (*Soil Taxonomy*). The Brazilian Soil Classification System (SiBCS), due to the similarities of tropical environments, mainly to the Amazon, could be useful for transferring pedological knowledge. This work had aims: to interpret and correlate the soils of the northern region of Suriname with the SiBCS and WRB and to serve as a basis for the elaboration of projects with the technical classifications for the planning of the land use. in addition to proposing a classification method using classification techniques object-based image analysis (OBIA) with machine learning (ML) to classify and characterize areas of gold mining in Suriname. Soil samples were collected at several points for recognition and correlation with soil classes. Physical, chemical and mineralogical analyzes were carried out to characterize the properties of the soils. Suriname soil maps were generated using the WRB and SiBCS systems. Images from the Landsat 5 (2001 and 2008), Landsat 8 (2014) and Sentinel-2A (2020) satellites were used for temporal analysis of changes in use and coverage of mining areas. In the Yaung Coastal Plain, was observed that predominance of Gleissolos (Gleysols), followed by Organossolos Háplicos (Folic Histosols) with formation of peats. In this region, in smaller quantities, occur the Neossolos Quartzarênicos (Arenosols). In the Old Coastal Plain, Plintossolos (Plinthosols) and Argissolos (Acrisols). In the Savanna Coverage predominate the Espodossolos (Podzols) and Neossolos Quartzarênicos (Arenosol). In the Highlands, more developed and dystrophic soils predominate, Latossolos (Ferrasols), Argissolos (Acrisol) and Plintossolos (Plinthosol), also occurring Neossolos Flúvicos (Flúvisols), Neossolos Litólicos (Leptosols) and Cambissolos Háplicos (Cambisols). Between 2001 and 2008 the mining area increased by 100%, exploiting the middle parts of the basin with hydraulic mining. In the period from 2008 to 2014, the mining area tripled, evolving into the lower and upper parts of the

Maurouni river basin with the beginning of mechanical excavation. Between 2014 and 2020, the increase was 27%, and 97% of which due to mechanical excavation mainly at the head of the basin, increasing the potential for contamination of this basin. The SiBCS can be used in Suriname to contribute to the transfer of pedological knowledge for better planning of land use and natural resources in the country. The proposed method of classification gold mining had great potential to classify and characterize gold mining areas, offering better analysis and monitoring of the environmental impact in excavation and hydraulic mining areas.

Keywords: Environmental sustainability. Land use planning. Machine learning. Remote sensing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO 1: INTERPRETAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS SOLOS DA REGIÃO NORTE DO SURINAME COM O SiBCS E WRB	13
RESUMO.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1. Características da área de estudo.....	17
2.2. Amostragem e aquisição de dados de solos	21
2.2. Análises de solos	24
2.3. Análises físicas.....	24
2.4. Análises químicas.....	24
2.5. Análise mineralógica.....	24
2.6. Elaboração do mapa com as classes dos solos com SiBCS e WRB	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
3.1. Correlação das unidades de mapeamento de solos do SiSCS com as classes de solos do SiBCS e WRB	27
3.2. Características dos solos em cada geoambiente.....	37
3.2.1. Planície Costeira Jovem	37
3.2.2. Planície Costeira Antiga.....	48
3.2.3. Cobertura Savânica	55
3.2.4. Interior - Parte Alta	58
4. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	63
CAPÍTULO 2 – CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS DE MINERAÇÃO DE OURO NO SURINAME USANDO TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGENS BASEADA EM OBJETOS E APRENDIZADO DE MÁQUINAS	65
RESUMO.....	65
1. INTRODUÇÃO.....	67
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	69
2.1. Área de estudo.....	69
2.2. Tipos de exploração e definição das classes uso e cobertura do solo (CUCS)	70
2.2.1. Tipos de exploração	70
2.2.2. Classes de uso e cobertura do solo (CUCS) e coleta de amostras.....	71

2.3. Conjunto de dados - database.....	73
2.3.1. Imagens de satélite	73
2.4. Processamento das imagens	73
2.4.1. Segmentação das imagens.....	73
2.5. Geração do banco de dados – Dataset.....	74
2.6. Método de classificação usando técnicas de OBIA e ML.....	75
2.6.1. Extração de valores e cálculo de parâmetros estatísticos.....	75
2.6.2. Seleção e eliminação de covariáveis	75
2.6.3. Treinamento e predição.....	77
2.6.4. Avaliação da acurácia.....	77
2.6.5. Mapa e resultados.....	77
2.7. Pós-processamento das imagens	77
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
3.1. Covariáveis selecionadas pelo método.....	78
3.2. Classificação e avaliação do desempenho dos mapas multitemporais.....	79
3.3. Caracterização das áreas de mineração	82
3.3.1. Análise multitemporal das mudanças e evolução das áreas de mineração	82
3.3.2. Distribuição das CUCS nos tipos de mineração escavação mecânica e hidráulica	86
4. CONCLUSÕES	87
AGRADECIMENTOS	87
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE	92
ANEXO	96

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Suriname localiza-se na costa norte do continente Sul-Americano, no Planalto das Guianas, entre a Guiana Francesa e a Guiana. A sua área é de 163.821 km², praticamente o mesmo tamanho do Estado do Acre. Até o século XV o país era habitado por povos originários antes da chegada dos espanhóis. Entretanto, foram os ingleses os primeiros a colonizar este território. Em 1667, a Inglaterra cedeu o território a Holanda (Países Baixos), que utilizou as áreas para plantio de cana-de-açúcar e, mais tarde para a cultura do cafeeiro, com o uso de mão-de-obra escrava oriunda da África (Rutgers e Scott, 1998). Ainda, segundo esses autores, em 1863, com o fim da escravidão, a mão-de-obra foi substituída por imigrantes de países como Índia, Indonésia e China. A colonização holandesa permaneceu até 1975, quando país se tornou independente, trocando o nome de Guiana Holandesa para Suriname. Na década de 1980 o país foi governado por uma ditadura militar até 1987, quando ocorreram as eleições, mas em 1990 ocorreu outro golpe militar, e apenas em 1994 houve novas eleições (Lier e Yperen, 2013).

A população do Suriname é de aproximadamente 590 mil habitantes, o que corresponde a 3,6 habitantes por km² (GBS, 2019). A maior concentração populacional está na região costeira, no norte do país, na sua capital, Paramaribo. Essa população é composta principalmente pelos grupos étnicos indianos, afrodescendentes, javaneses, ameríndios, chineses, brasileiros, descendentes e misturas de grupos étnicos. A língua oficial é Neerlandês, mas são faladas outras línguas como inglês e a língua local o crioulo (surinamês) por grande parte da população.

O país é um dos maiores do mundo com cobertura florestal proporcional, com 93% (15,2 milhões de ha) do seu território, sendo que menos de 1% das terras são cultivadas, e estão localizadas principalmente na Planície Costeira Jovem (SBB, 2017; Holband, 2020). Originalmente, essas áreas eram alagadas e somente após ter realizado a drenagem artificial, tornou-se cultivada, onde cerca da metade é ocupada com plantio de arroz, seguido por bananas, frutas cítricas, cocos e óleo de palma, sendo grande parte da produção exportada. Outros principais produtos de exportação são ouro, petróleo bruto e madeira (SBB, 2017).

O Suriname pode ser dividido geograficamente em quatro principais geoambientes: as Planícies Costeira Jovem e Antiga, Cobertura Savânica e as Terras Altas do embasamento cristalino com floresta tropical (Nordam, 1993).

Quanto aos aspectos dos solos, em razão da influência da colonização, é utilizado pelo Governo Surinamês o Sistema Surinamês de Classificação dos Solos (SiSCS) que se baseia no sistema holandês e americano (*Soil Taxonomy*) (Van der Eyk, 1957; Van der Voorde, 1957) e

não se enquadra como classificação Taxonômica, sendo mais geomorfológica (De Boer, 1975) e encontra-se desatualizada.

O Sistema Brasileiro de Classificação (SiBCS) é um sistema taxonômico que poderia ser útil ou mesmo aplicado como estudo com área de referência em razão do ambiente tropical semelhante ao amazônico e a proximidade geográfica com o Brasil, colaborando principalmente para elaboração de projetos com o uso das classificações técnicas de uso da Terra (Ramalho Filho, 1999; Lepsch, 1991) e de projetos de Zoneamentos (Brasil, 1991), que podem auxiliar nas políticas públicas no ordenamento territorial e melhor planejamento do uso e manejo dos solos.

No Suriname, nos últimos anos, houve aumento crescente no desmatamento ocasionado principalmente pela mineração de ouro (SBB, 2017) e pela exploração de madeira por empresas chinesas. A mineração de ouro ocorre desde a década de 80, mas nos últimos 20 anos houve aumento considerável das áreas, principalmente no período entre 2008 a 2015, o que ocasionou um forte impacto ambiental, com contaminação por mercúrio nos corpos hídricos e no solo, afetando diretamente à saúde dos mineradores e das comunidades próximas das margens dos rios e, indiretamente, às populações que vivem nos centros urbanos (Ouboter, 2015; Ottenbros et al., 2019).

Neste contexto, o presente trabalho teve o objetivo geral de interpretar e correlacionar os solos da região norte do Suriname com o SiBCS e WRB, e propôs um método de classificação utilizando as técnicas de OBIA com AM para classificar e caracterizar áreas afetadas pela mineração de ouro no Suriname.

Sendo assim, a tese está dividida em dois capítulos. O primeiro, intitulado “Interpretação e correlação dos solos na região norte do Suriname com SiBCS e WRB”, e o segundo capítulo intitulado “Classificação e caracterização de áreas de mineração de ouro no Suriname usando técnicas de baseada na análise de objetos (OBIA) e aprendizado de máquina (AM).

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Presidência da República. Secretaria de Assuntos Estratégicos. Comissão Coordenadora do Zoneamento Ecológico Econômico do Território Nacional. Brasília, 1991. 20p.
- DE BOER, M.W.H. A system of soil classification for Suriname. Ministry of Development Soil Survey Department Suriname. 1979. 59p.
- GENERAL BUREAU OF STATISTICS (GBS). Demographic data 2015-2018. Paramaribo, Suriname, 2019. Disponível em <https://statistics-suriname.org/wp-content/uploads/2020/02/Demografische-Statistieken-2015-2018.pdf>: Acessado em: 20/12/2022.
- HOLBAND R.G. Features and problems of land use of the republic of Suriname. In: Land management, past-present-future. 2020. p. 356-362.
- LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4ª aproximação. Campinas: SBCS. 1991. 175p
- LIER, R.A.J. AND YPEREN, M.J. Frontier society: a social analysis of the history of Surinam. Springer Science & Business Media. 2013. 439p.
- NOORDAM, D. (1993). The geographical outline. In: OUBOTER, P.E. (eds) The Freshwater Ecosystems of Suriname. Monographiae Biologicae, vol 70. Springer, Dordrecht. .
- OTTENBROS, I.B.; BOERLEIDER, R.Z.; JUBITANA, B.; ROELEVELD, N.; SCHEEPERS, P.T.J. Knowledge and awareness of health effects related to the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in Suriname. Environment International. 2019, 122: 142-150.
- OUBOTER, P.E. Review of mercury pollution in Suriname. Academic Journal of Suriname. 2015, 6: 531-543.
- RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, L. C. Aptidão agrícola das terras do Brasil: potencial de terras e análise dos principais métodos de avaliação. EMBRAPA. 1999. 46p.
- RUTGERS, W.; SCOTT, R. Dutch Caribbean Literature. Callaloo. 1998, 21, 542-555.
- STICHTING VOOR BOSBEHEER EN BOSTOEZICHT (SBB). Surinaamse Bosbouwsector 2017. Paramaribo, Suriname, 2019. Disponível em: <http://sbbsur.com/wp-content/uploads/2019/03/rapport-bosbouw-sector-2017.pdf>. Acessado em: 15/11/2022.
- VAN DER EYK J.J. Reconnaissance soil survey in Northern Surinam. Dissertação (Mestrado) Wageningen: Wageningen University and Research. 1957.
- VAN DER VOORDE P.K.J. Soil conditions of the ridge landscape and of the old coastal plain of Suriname. De bodemgesteldheid van het ritsenlandschap en van de oude kustvlakte in Suriname. Landbouwproefstation in Suriname Bulletin. 1957.

CAPÍTULO 1: INTERPRETAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS SOLOS DA REGIÃO NORTE DO SURINAME COM O SiBCS E WRB

RESUMO

O Suriname localiza-se na costa norte do continente Sul-Americano, no Planalto das Guianas. É o país que possui a maior cobertura florestal proporcional do planeta. Pode ser dividido em quatro principais geoambientes: Planícies Costeiras Jovem e Antiga, Coberturas Savânicas e Terras Altas do Embasamento Cristalino. O Sistema Surinamês de Classificação de Solos (SiSCS) baseia-se no sistema holandês e na *Soil Taxonomy*. O SiSCS encontra-se desatualizado, e por não ser taxonômico dificulta realizar observações e estabelecer comparações dos solos com os ambientes de forma ampla, além da transferência do conhecimento. O SiBCS, em razão da proximidade geográfica e o ambiente tropical semelhante entre os dois países, principalmente ao amazônico, poderia ser útil para transferência de conhecimentos de estudos pedológicos e o uso das classificações técnicas aplicados ao melhor planejamento do uso da Terra. Esse trabalho objetivou-se interpretar e correlacionar os solos da região norte do Suriname com o SiBCS e WRB e servir como base para elaboração de projetos com as classificações técnicas para o planejamento do uso da Terra. Foram coletadas amostras de solos em diversos pontos para reconhecimento e correlação com as classes de solos. Dados de perfis de solos da ISRI também foram utilizados para melhor correlação dos sistemas de classificação. Análises físicas, químicas e mineralógicas foram realizadas para caracterização das propriedades dos solos. Mapas de solos com o SiBCS e WRB na escala de 1:500.000 foram gerados. Dez classes de solos em primeiro nível no SiBCS e WRB foram identificadas e 24 e 25 classes até o terceiro nível no SiBCS e na WRB respectivamente nos geoambientes do norte do Suriname. Na Planície Costeira Jovem, predominam: Gleissolos (Gleysols), que podem ser separados em Gleissolo Háplico Ta Eutróficos (Eutric Gleysols), Gleissolo Háplico Sódico (Tidalic Sodic Gleysols) e Gleissolo Tiomófico Órtico típico (Thionic Gleysols). Na Planície Jovem também ocorrem também solos arenosos: Neossolo Quartzarênico Ortico típico (Dystric Arenosols) e o Neossolo Quartzarênico êutrico carbonático (Calcaric Eutric Arenosols) ricos em conchas calcárias. Nesse ambiente também pode ser encontrado o Organossolo Háplico (Folic Histosols), nos pântanos alagados com água doce (formação de turfeiras). Na Planície Costeira Antiga predominam os Plintossolos (Plinthosols), podendo ocorrer o Plintossolo Háplico Distrófico típico (Haplic Clayic Plinthosol) e o Plintossolo Pétrico Concrecionário (Petric Plinthosol). O Argissolo Amarelo Distrófico plintossolico (Chromic Acrisol (Loamic)) também ocorre nesse ambiente. No ambiente de Cobertura Savânica do período do Plioceno

sobre a formação Coesewijne predominam solos arenosos: Espodossolo Humilúvico (Podzols) e os Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Dystric Arenosols). Nas Terras Altas do Interior ocorre a presença dos solos mais desenvolvidos e distróficos, com predomínio dos Latossolos (Ferrasols), Argissolos (Acrisols) e Plintossolos (Plinthosols) e esses solos podem apresentar a fase pedregosa em ambientes mais montanhosos com a formação de fragmentos de calhaus de lateritas, bauxitas, quartzo e outros ao longo dos perfis. Nesse ambiente também é encontrado os Neossolos Fúvicos (Flúvisols), Neossolos Litólicos (Leptosols) e Cambissolos (Cambisols). O SiBCS pode ser utilizado no Suriname de forma a contribuir para melhor compreensão dos ambientes assim como transferência de conhecimentos pedológicos para melhor planejamento do uso da Terra e dos recursos naturais do país.

Palavras chaves: Zoneamento Ecológico-Econômico. Aptidão Agrícola das Terras. Capacidade de uso das terras. Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Suriname is located on the north coast of the South American continent, in the Guiana Plateau. It has the largest proportional forest cover on Planet Earth. It can be divided into three main geoenvironments: Young and Old Coastal Plains, Savannah Covers and Crystalline Basement Highlands. The Suriname Soil Classification System (SiSCS) is based on the Dutch system and Soil Taxonomy. The SiSCS is outdated, and because it is not taxonomic, it makes it difficult to carry out observations and establish broad comparisons between soils and environments, in addition to transferring knowledge. The SiBCS due to the geographic proximity and the similar tropical environment between the two countries, mainly the Amazonian one, could be useful for transferring knowledge from pedological studies and the use of technical classifications applied to better land use planning. This work aimed to interpret and correlate the soils of the northern region of Suriname with the SiBCS and WRB and serve as a basis for the elaboration of projects with technical classifications for land use planning. Soil samples were collected at several points for recognition and correlation with soil classes. ISRI soil profile data were also used for better correlation of classification systems. Physical, chemical and mineralogical analyzes were performed to characterize soil properties. Soil maps with SiBCS and WRB at a scale of were generated. Ten soil classes at the first level in SiBCS and WRB were identified and 24 and 25 classes up to the third level in SiBCS and WRB respectively in the

geoenvironments of northern Suriname. In the Young Coastal Plain, the predominate: Gleissolos (Gleysols), which can be separated into Gleissolo Háplico Ta Eutrófico (Eutric Gleysol), Gleissolo Háplico Sódico (Tidalic Sodic Gleysol) and Gleissolo Tiomófico Órtico típico (Thionic Gleysol). Sandy soils also occur in the Young Plain: Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Dystric Arenosol) e o Neossolo Quartzarênico Eutríco carbonático (Calcaric Eutric Arenosol) rich in shells. The Organossolo Háplico (Folic Histosol) can also be found in this environment, in swamps flooded with fresh water (bog formation). In the Old Coastal Plain, the Plintossolos (Plinthosol)s predominate, and the typical Plintossolo Háplico Distrófico típico (Haplic Clayic Plinthosol) and Plintossolo Pétrico Concrecionário (Petric Plinthosol) occur. Argissolos (Chromic Acrisols (Loamic)) also occurs in this environment. In the Savannah Cover predominate sandy soils: Espodossolo Humilúvico (Podzol) and Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Dystric Arenosol). In the Highlands of the Interior there is the presence of more developed and dystrophic soils, with a predominance of Latossolos (Ferrasols), Argissolos (Acrisols) and Plintossolos (Plinthosols) and these soils may present the stony phase in more mountainous environments with the formation of fragments of pebbles of laterites, bauxites, quartz and others along the profiles. In this environment, the Neossolos Flúvicos (Flúvisol), Neossolos Litólicos (Leptosol) and Cambissolos (Cambisol) are also found. The SiBCS can be used in Suriname to contribute to a better understanding of the environments and to transfer of pedological knowledge for better planning of land use and natural resources in the country.

Keywords: Ecological-Economic Zoning. Land Suitability for Agriculture. Land Use Capacity. Environmental sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O Suriname localiza-se na costa norte do continente Sul-Americano, no Planalto das Guianas, com área de 163.821 km². Sua população é de aproximadamente 590 mil habitantes o que corresponde a 3,6 habitantes por km² (GBS, 2019). A maior concentração populacional encontra-se na região costeira, ao norte, principalmente na capital, Paramaribo.

É um dos países que possuem ainda uma expressiva cobertura florestal proporcional, com 93% do seu território (15,2 milhões de ha) ocupado com vegetação primária. Apenas pouco menos de 1% das suas terras são cultivadas, as quais estão localizadas principalmente na Planície Costeira Jovem (SBB, 2017). Essas áreas em grande parte foi realizado drenagem artificial, para serem cultivadas devido ao fato de estarem grande parte do ano alagadas. Dessas áreas mais da metade das terras cultivadas são com a rizicultura, seguidos por bananas, frutas cítricas, cocos e óleo de palma. Grande parte da produção é exportada. Outros produtos importantes de exportação são ouro, petróleo bruto e madeira (SBB, 2017).

Geograficamente o Suriname pode ser dividido em quatro principais geoambientes: as Planícies Costeira Jovem e Antiga, Cobertura Savânica e as Terras Altas do embasamento cristalino com floresta tropical (De Boer, 1979). Cada geoambiente com características pedológicas próprias. Porém, os solos deste país foram pouco estudados e os principais trabalhos foram realizados na década de 70, ainda sob a tutela neerlandesa, quando foi desenvolvido um sistema de classificação próprio para os solos do país (Sistema Surinamês de Classificação de Solos - SiSCS), com forte influência do sistema holandês e da *Soil Taxnomy* (Van der Eyk, 1957; Van der Voorde, 1957). A elaboração deste sistema iniciou em 1948, porém, foi parcialmente completado em 1978 (De Boer, 1979), e desde então não houve alterações e adaptações. O SiSCS (Van der Eyk, 1957), possui quatro níveis: sendo os três primeiros fisiográficos, baseados no relevo (*Lanform*), paisagem (*Landscape*) e elementos da paisagem (*Landscape-elementes*). O último e quarto nível é morfológico (De Boer, 1979). Com relação ao mapeamento de solos, sua última versão foi elaborada em 1978 na escala de 1:500.000 e considera apenas os três primeiros níveis e possui 52 unidades dos solos com os três principais níveis com diferentes características fisiográficas (De Boer, 1978).

Ao contrário do SiSCS, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Embrapa, 2018), o *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (WRB, 2014) e o *Soil Taxonomy* (ST) são sistemas de classificações taxonômicos e hierárquicos e consideram,

primeiramente, as características morfológicas do solo e posteriormente dos ambientes, como o relevo e a vegetação, ou seja, busca compreender a relação dos solos com a paisagem.

Segundo Resende et al. (2014), o solo é considerado o melhor estratificador de ambientes e auxilia a estabelecer relações com a paisagem e compreender a sua ocorrência geográfica e com isso identificar as potencialidade e limitações de cada ambiente diante dos diferentes usos os quais são submetidos. Ou seja, o Sistema de Classificação Taxonômico facilita as observações e estabelece comparações dos solos com os ambientes de forma mais ampla. Essa classificação também permite transferência do conhecimento mais rápida e eficiente, além de servir como base para várias classificações técnicas com vista a utilização agrônômica e ambientais desses solos (Resende et al., 2014). No caso do SiSCS, ele traduz pouco as condições de campo e dificulta a interpretação e a transferência de conhecimento principalmente para quem não tem base de conhecimento em solos, além de encontrar-se desatualizado, com poucos estudos atuais a nível de publicações científicas.

O SiBCS poderia ser útil ou mesmo aplicado em razão da proximidade geográfica e semelhança do ambiente tropical amazônico do Brasil, pois além das condições ambientais poderia aproveitar grande partes dos estudos pedológicos já realizados em diversos solos e ambientes do Brasil, principalmente para elaboração de projetos de planejamento do uso da Terra com o usos das classificações técnicas de Aptidão Agrícola das Terras (AAT) (Ramalho Filho e Pereira, 1999), Capacidade de Uso das Terras (CUT) (Lepsch et al., 1991) e de projetos de Zoneamentos (Brasil, 1991), que poderiam auxiliar no ordenamento territorial, e projetos de manejos e conservação dos solos mais sustentáveis.

Neste contexto, esse trabalho teve o objetivo interpretar os solos e correlacionar as unidades de mapeamento do SiSCS (De Boer, 1978) com o SiBCS (Embrapa, 2018) e WRB (WRB, 2014), e a sua distribuição geográfica, assim servir de base para estudos mais detalhados com o uso das classificações técnicas para melhor planejamento no uso da Terra e dos recursos naturais de forma sustentável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Características da área de estudo

A área de estudo está localizada na região norte do Suriname entre 4°N a 6°N e 54°W e 58°W, com área aproximada de 74.200 km². O clima da região é tropical com temperaturas médias anuais variando de 27 a 33 °C e precipitação anual entre 2.200 e 2.400 mm (Moekiran, 1995).

A área de estudo possui quatro principais geoambientes do Suriname: as Planícies Costeiras Jovem e Antiga, Cobertura Savânica e as Terras Altas do Interior (Figura 1 e 2). As Planícies Costeiras possuem largura entre 10 e 100 km e 364 km de extensão de costa marítima, sendo que as Planície Costeira Jovem possuem área de 17.000 km², com variação de altitude de 0 a 10 metros acima do nível do mar (Augustinus et al., 1989). Sua formação é do período do Holoceno por depósitos de sedimentos oriundos da bacia amazônica, com formação de solos argilosos e pantanosos com turfas (Augustinus e Slager, 1970). A região é atravessada paralelamente por solos arenosos formados por antigos cordões arenoso e solos arenosos ricos em conchas nas cristas praias.

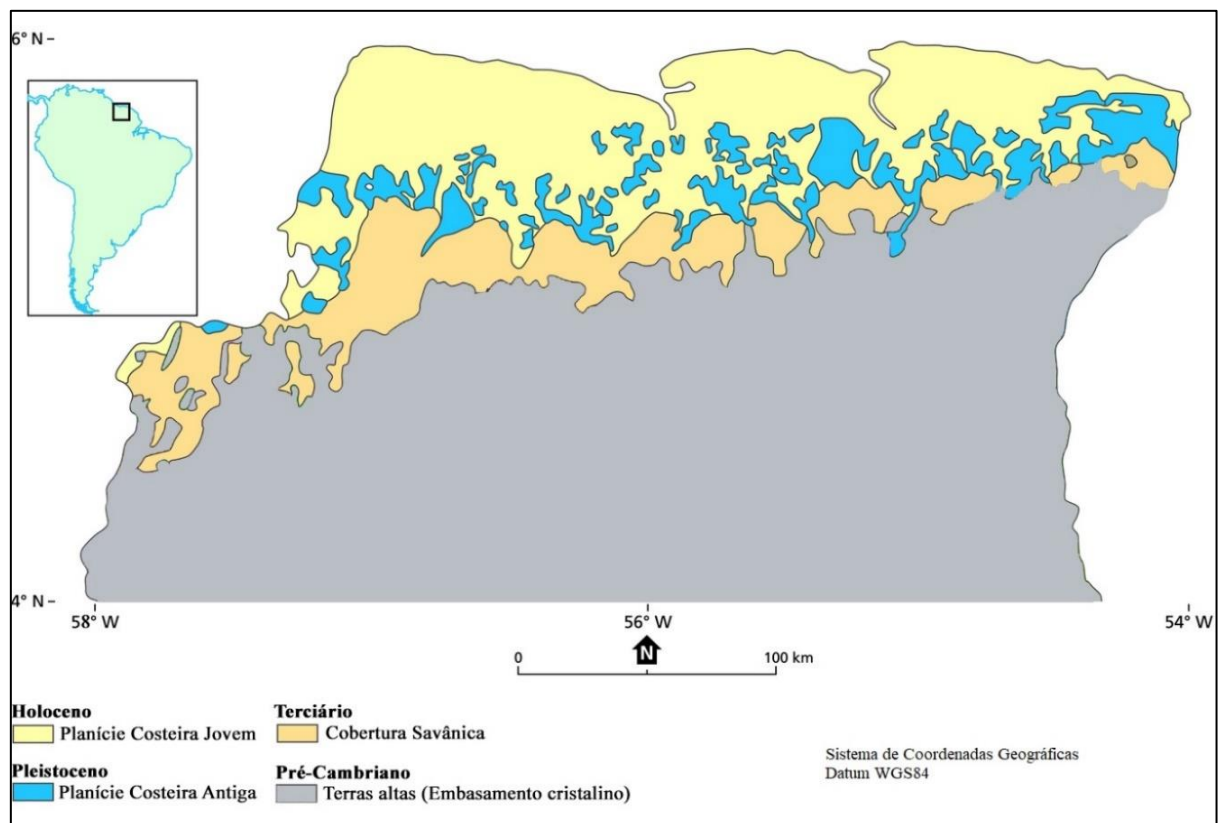


Figura 1. Mapa dos geoambientes da região norte do Suriname, modificado de Kroonenberg et al. (2016).





Figura 2. A) **Planície Costeira Jovem**, com áreas planas e mal drenadas e formação de pântanos; B) **Planície Costeira Antiga**, com floresta de árvores com porte médio; C) **Cobertura Savânica**, com solos arenosos e esbranquiçados, com vegetação de transição entre gramíneas e pequenos arbustos, com presença de lençol freático alto com coloração escura; D) **Região do Interior**, com vegetação densa com porte alto em relevo dissecado.

A Planície Costeira Antiga é do período do Pleistoceno e consiste em áreas um pouco mais dissecadas com solos argilo-siltosos, com baixa drenagem. Os ambientes de Cobertura Savânica possuem normalmente paisagem de colinas onduladas com 64 km de largura. Esta formação normalmente possui solos com sedimentos do Terciário (atual Neógeno e Paleoceno), pertencentes a formação Coesewijne, formados por areias finas de coloração branqueada, compostos por quartzo, sendo coberta em grande parte por vegetação Savânica, podendo também estar coberta por floresta tropical.

As regiões do interior ou terras altas, possuem altitude entre 10 a 1.000 metros e estão sobre o Embasamento Cristalino formado por rochas do período Pré-Cambriano sobre o escudo da Guiana do tipo granitóides, gnaisses metassedimentares e metavulcânicas, que normalmente encontra-se nas cotas acima dos 50 metros. Esse geoambiente se estende-se ao sul do país até a fronteira com o Brasil, ocupando cerca de 80% do Suriname. Consiste ainda em grande parte por relevo dissecado com formação de solos profundos e intemperizados cobertos por floresta tropical e a formação de algumas cadeias de montanha (O'Herne, 1969; Kroonenberg et al., 2016).

2.2. Amostragem e aquisição de dados de solos

Foram visitados 28 pontos nos diferentes geoambientes e unidades de mapeamentos de solos do SiSCS em setembro de 2019 e 2022, sendo que em 17 pontos foram coletadas amostras de solos e em 11 pontos foram feitas observações quanto características dos ambientes e classificações (Figura 3). Nos pontos de coleta foram coletadas amostras de solos em diferentes profundidades em mini trincheiras e por tradagem. As amostras coletadas foram acondicionadas em embalagens plásticas, identificadas e posteriormente encaminhadas aos laboratórios para realização das análises físicas, químicas e mineralógicas. Nos pontos visitados foram obtidas informações sobre as características gerais dos solos e ambientes quanto ao relevo, uso e cobertura dos solos, altitude, classificação com base no SiSCS, SiBCS e WRB (Apêndice 1A). Esses dados têm como finalidade identificar os solos, e correlacionar as unidades de classificação dos solos do Suriname, com a SiBCS e WRB. Os solos coletados nos diferentes perfis foram descritos conforme (Santos et al., 2013) e classificados pela SiBCS (Embrapa, 2018) e WRB (WRB, 2014)

Dados de nove perfis de solos adquiridos através do site da ISRI (<https://www.isric.org/explore/soil-geographic-databases>) com características físicas e químicas, e classificados segundo a WRB (WRB, 2016), foram utilizados para complementar

a interpretação e correlação dos solos do SiBCS (Apêndice 2A). Os perfis foram reclassificados pelos critérios do SiBCS (Embrapa, 2018) até o quarto nível categórico.

O mapa de solos com as unidades de mapeamento com o SiSCS (De Boer, 1978) da região norte do Suriname, na escala de 1:500.000, foi obtido através site da ESDAC (*European Soil Data Centre*) (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>). O mesmo mapa foi vetorizado e cedido pela Embrapa Solos, sendo os vetores dos solos das áreas de proteção ambiental complementados utilizando o software Quantum GIS 3.26.



Figura 3. Localização dos perfis coletados e observados dos solos na região norte do Suriname.

2.2. Análises de solos

As amostras de solos coletadas foram secas ao ar, peneiradas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e encaminhadas ao laboratório do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, para as seguintes análises físicas, químicas e mineralógicas.

2.3. Análises físicas

As amostras foram separadas através da dispersão mecânica e química, em agitador rotativo tipo Wagner com solução de NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) por 16 horas a 60 rotações por minuto. Posteriormente as amostras foram separadas na fração areia grossa (2 – 0,2 mm), areia fina (0,2 - 0,05 mm) através das peneiras e as frações silte e argilas separadas através da sedimentação.

2.4. Análises químicas

O pH foi determinado em água e os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos por KCl 1 mol L^{-1} e quantificados por espectroscopia de absorção atômica. Os teores de P, Na, K, micronutrientes (Cu, Mn, Fe, Zn), metais pesados (Cr, Ni, Cd, Pb) foram extraídos com HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ (Mehlich-1) e determinados por fotometria de chama e colorimetria. A acidez potencial (H + AL) foi extraída por acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 determinada por solução com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e quantificada por fotometria de chama. O carbono orgânico total foi determinado pelo método Walkley-Black, com oxidação da matéria orgânica, por via úmida, com dicromato de potássio $0,1667 \text{ mol L}^{-1}$ sem aquecimento (Embrapa, 1997). A titulação foi realizada com sulfato ferroso amoniacal $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado no espectrofotômetro. O Enxofre foi extraído com fosfato monocíclico em ácido acético; os teores de Boro foram determinados a partir de sua extração com água quente por espectrofotômetro de absorção molecular. Com os resultados foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) e potencial (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e índice de saturação por sódio (ISNa).

2.5. Análise mineralógica

As amostras foram dispersas com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ em agitação lenta por 16 horas, a 60 voltas por minuto e posterior separação por peneiramento (areia) e sedimentação (silte e argila). A fração argila foi separada da fração silte através da sedimentação e o material preparado da fração argila foi elaborado lâminas orientadas (método esfregaço). A composição mineralógica

da fração argila foi determinada por DRX, usando radiação Co-K α , a $0,02^\circ 2\theta s^{-1}$ na faixa de 3 a $70^\circ 2\theta$.

2.6. Elaboração do mapa com as classes dos solos com SiBCS e WRB

As unidades de mapeamento de solos do mapa de reconhecimento dos solos da região norte do Suriname na escala de 1:500.000 (Figura 4), foram reclassificadas com o SiBCS (Embrapa, 2018) e WRB (WRB, 2014), com base nas características descritas no mapa de Landform, Lansdscape e Landscape-elements e com os dados descritos e analíticos dos pontos de solos coletados e observados em diferentes unidades e geoambientes. A reclassificação das unidades de mapeamento do mapa foram feitas utilizando o software Quantum GIS 3.26.2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Correlação das unidades de mapeamento de solos do SiSCS com as classes de solos do SiBCS e WRB

Dez classes de solos no primeiro nível e 24 classes até o quarto nível categórico do SiBCS e dez classes no primeiro nível e 25 classes até o terceiro nível da WRB foram identificados nos geoambiente da região norte do Suriname (Tabelas 1 e 2; Figuras 5 e 6).

Tabela 1. Unidades de mapeamento dos solos do SiSCS com o SiBCS e WRB separados por geoambientes na região norte do Suriname

SiSCS (Unidades)	SiBCS	Sigla	WRB	Área	%
Planície Costeira Jovem					
4,6,7,11,12	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico	GXve	Eutric Gleysol	6.342,8	38,7
13	Gleissolo Tiomórfico Órtico típico	GJo	Thionic Gleysol	4431	27
10	Neossolo Flúvico textura argilosa	RY	Fluvisol (Clayic)	1.702,7	10,4
9	Neossolo Flúvico textura siltosa	RY	Fluvisol (Siltic)	507,2	3,1
2,3	Gleissolo Háptico Sódico êutrico	GZn	Tidalic Sodic Gleysol	1.331	8,1
8	Organossolo Háptico	GMbd	Folic Histosol	952,6	5,8
5	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	RQo	Dystric Arenosol	807,6	4,9
1	Neossolo Quartzarênicos Órtico êutrico carbonático	RQoe	Calcaric Eutric Arenosol	306	1,9
Planície Costeira Antiga					
15	Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico	PAd	Chromic Acrisol (Loamic)	0,47	19,6
14	Neossolo Quartzarênico Órtico típico + Espodossolo Humilúvico	RQo	Dystric Arenosol+ Podzol (Arenic)	214,31	3,7
13	Plintossolo Háptico Distrófico típico	FXd	Haplic Plinthosol (Dystric Clayic)	4.467,95	76,8
Cobertura					
19, 26	Espodossolo Humilúvico Órtico	EKo	Albic Podzol (Arenic)	2.654,5	41,85
20, 27	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	RQo	Dystric Arenosol	3.689,3	58,15
Interior – Parte alta					

31, 42	Latossolo Amarelo Distrófico fase pedregosa	LAd	Xanthic Skeletic Ferrasol (Dystric)	7.589,5	16,25
32	Latossolo Vermelho Distrófico fase pedregosa	LVd	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	2.510,5	5,37
25	Latossolo Vermelho Distrófico fase epipedregosa	LVd	Rhodic Skeletic Ferrasol (Dystric)	852,4	1,82
22, 29, 41	Latossolo Vermelho - Amarelo Distrófico	LVAd	Chromic Ferrasol (Dystric)	6.867,1	14,70
24, 28, 33,35, 36, 38, 43, 44, 47	Latossolo Vermelho- Amarelo Distrófico fase pedregosa	LVAd	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	6.609,2	14,15
30, 34, 37, 39, 45, 48, 50, 51, 52	Plintossolo Pétrico Concrecionário	LVAd	Petric Plinthosol	8.806,4	18,85
40	Cambissolo Háptico Tb Distrófico fase pedregosa	CXbd	Cambisol Skeletic (Dystric)	5.793,3	12,40
21	Argissolo Vermelho- Amarelo Distrófico fase epipedregosa	PVAd	Chromic Skeletic Acrisol (Glayic)	2.906,2	6,22
18, 23	Argissolo Vermelho- Amarelo Distrófico	PVAd	Chromic Acrisol (Glayic)	962,8	2,06
17	Neossolo Flúvico	RY	Fluvisol (Clayic)	2.044,8	4,38
49, 46	Neossolo Litólico	RL	Leptosol	1.765,8	3,78

Tabela 2. Organização e características das unidades de mapeamento dos solos do SiSCS (De Boer, 1979) correlacionadas com SiBCS (Embrapa, 2018) e WRB (WRB, 2014)

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)
						SiBCS	WRB	
1°		2°		3°				
FLAT AND UNDULATING VERY LOW LAND (<8%, 0 - 10m)	Young Coastal Plain	Cronie	Comowine and Moleson	1	Ridge soils with (very) fine sand, sometimes medium or loamy sand to sandy loam, sand with shell grit, or shells	Neossolo Quartzarênico Órtico Eutríco carbonático	Eutríc Calcaric Arenosol	306,1
				2	Unripe and practically unripe saline swamp clay soils	Gleissolo Sálico Sódico	Tidalic Gleysol (Sodic)	963,5
				3	Practically unripe and half-ripe brackish swamp clay soils	Gleissolo Sálico Sódico	Tidalic Gleysol (Sodic)	367,3
				4	Half-ripe and nearly ripe swamp clay soils, mostly desalinized to a depth of more than 1 meter	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutríc Gleysol	3327,2
			Wanica	5	Ridge soils with (loamy very) fine sand, and sometimes sandy loam	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	Dystric Arenosol	807,8
				6	Ripe swamp clay soils, mostly desalinized to more than 2 meter depth	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutríc Gleysol	409,3
				7	Nearly ripe swamp clay soils, mostly desalinized to more than 2 m depth sometimes with loamy topsoil	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Gleysols Eutríc	1.010,6
			Uncorrelated	8	Fresh water swamp and marsh with ombrogenous thick peat cover	Organossolo Háplico	Folic Histosol	952,6
				9	Riverain and estuarine soils with silt and silt loam	Neossolo Flúvico textura siltosa	Fluvisol (Siltic)	507,2

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)	
						SiBCS	WRB		
				10	Half-ripe to ripe river and estuarine clay soils	Neossolo Flúvico textura argilosa	Fluvisol (Clayic)	1.702,7	
				11	Ripe polder clay (sometimes loam) soils (predominantly plantations)	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol (Drainic)	1.215,2	
				12	Half-ripe polder clay soils (rice fields)	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol (Drainic)	380,5	
				13	Unripe and practically unripe mostly pyritic swamp clay soils	Gleissolo Tiomófico Órtico típico	Thionic Gleysol	4.453,1	
				14	Ridge and plateau soils with (very) fine (bleached) sand, and sometimes clay	Neossolo Quartzarênico Órtico típico+ Espodossolo Humilúvico	Dystric Arenosol + Albic Podzol (Arenic)	214,3	
	Old Costal Plain	LeLydorp or Old RidGes			15	Ridge and plateau soils with (very fine sandy) loam and very fine sand over clay	Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico	Xanthic Acrisol (Loamic)	1.138,35
					16	Plateau soils with silt loam and silt clay loam over stiff (silt) clay	Plintossolo Háplico Distrófico típico	Haplic Plinthosol (Dystric Clayic)	2.848,5
		Para or Old Marine Flat Landscape							
UNDULATING AND ROLLINH LOW LAND (2 - 16%, 10 -100m)				17	(Sandy) loam and clay leve and basin soils	Neossolo Flúvico	Fluvisol (Clayic)	2.044,8	
				18	Sand, sandy loam, sandy clay loam and clay soils; locally heavier textured denudation terrace soils	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Chromic Acrisol (Loamic)	655,2	
				Dek	19	Bleached medium and coarse sandy plateau and slope soils	Espodossolo Humilúvico Órtico	Albic Podzol (Arenic)	1.278,9
					20	Unbleached medium and coarse (loamy) sand, sandy (clay) loam to sandy clay plateau and slope soils	Neossolo Quartzarênico Órtico típicos	Dystric Arenosol	209,4

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)
						SiBCS	WRB	
		Tibiti		21	Plateau and slope soils with sandy (clay) loam and clay, locally with gravelly topsoil	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase epipedregosa	Chromic Acrisol (Clayic)	2.906,2
		Karia		22	Plateau and slope soils with probably gravelly sandy(clay) loam and clay	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Chromic Ferrasol (Dystric)	1.164,0
		Gonini		23	Plateau and slope soils with (loamy) sand, sandy (clay) loam and sandy clay	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Chromic Acrisol	307,6
		Compagnie		24	Ridge, plateau, slope and depression soils with sand, sandy(clay) loam and sandy clay, often gravelly	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	1.327,0
		Rama		25	Hill-top, plateau and slope soils with mostly gravelly clay	Latossolo Vermelho fase epipedregosa	Rhodic Skeletic Ferrasol (Dystric)	852,4
		DISSECTED LOW PLATEAUS (<8%, 16-50 or >; 10-100 m + NSP)		Kauri		26	Bleached medium and coarse sandy plateau a slope soil	Espodossolo Humilúvico Órtico
	27				Unbleached medium and coarse (loamy) sand, sandy (clay) loam to sandy clay plateau and slope soils, locally gravelly	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	Dystric Arenosol	3.479,9
HILLY LOW LAND (16 - 30%; 10 - 100 m)		Falawatra		28	Hill-top and slope soils with gravelly	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	1.151,5
		Awara		29	Hill-top, plateau and slope soils with sandy clay loam and sandy clay, sometimes gravelly	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Chromic Ferrasol (Dystric)	4.607,1
HILLY AND STEEPLY DISSICTED LOW LAND (16 - 30%; 10 - 100 m) ⁴		Matapi		30	Hill-top and slope soils with clay loam and clay often gravelly; ironstones occur on hill-tops	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	74,8

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)
						SiBCS	WRB	
		Godo		31	Hill-top, plateau and slope soils with (sandy) clay loam and (sandy) clay; locally a few stones on the soil	Latossolo Amarelo Distrófico	Xanthic Ferrasol (Dystric)	5482,623
		Tempati		32	Hill-top and slope soils with gravelly clay over clay	Latossolo Vermelho Distrófico fase pedregosa	Rhodic Skeletic Ferrasol (Dystric)	2500,79
		Donderbari		33	Hill-top and slope soils with gravelly clay	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Ferrasol (Dystric)	1818,623
		Browns		34	Hill-top plateau and slope soils with silt clay loams and clays; on the plateaus presumably de laterita	Plintossolo Pétrico Concrécionário	Petric Plinthosol	910,951
		Dalbana		35	Hill-top and slope soils with clay loam, silt clay loam and silt clay; often gravelly and locally many stones on the soil	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	154,768
		Ston		36	Hill-top and slope soils varying in texture from sand to sandy to silt and clay; moderate amount of stones on the soil	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	74,731
		NARROW AND STEEP LOW MODERATELY HIGHT RIDGES (25 - 50%; 10-300 m)		Lucas		37	Ridge and slope soils with gravelly clay; locally iron-stone and many iron-stones on the soil	Plintossolo Pétrico Concrécionário
Tom				38	Ridge and slope soils with mostly stony and gravelly clay loam (silt)clay; a moderate amount of stones on the soil	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	135,074
Poeketi				39	Ridge and slopes soils with probably gravelly clay loam and (silt) clay; locally continuous iron-stone and many stones on the soil	Plintossolo Pétrico Concrécionário	Petric Plinthosol	436,137

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)
						SiBCS	WRB	
STEEPLY DISSETED (MODERATELY) HIGHT LAND (>30%; 100-300 M +NSP)		Wonotobo		40	Hill-top, plateau and slop soils with sandy clay loam and sandy clay; often gravelly, with many stones on the soil	Cambissolo Háplico Tb Distrófico fase pedregosa	Dystric Skeletic Cambisol	5793,3
		Wilhelmina Marginal		41	Hill-top and slope soils with probably (sandy) clay loam and sandy clay	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Chromic Ferrasol (Dystric)	1095,9
		Tapanahony		42	Hill-top and slope soils, with probably mostly gravelly sandy clay	Latossolo Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Ferrasol (Dystric)	2102,9
		Bakhuis Marginal		43	Hill-top and slope soils, with probably gravelly clay loam and clay; presumably a moderate amount of stones on the soil	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	442,9
		Blanche Marie		44	Hill-top, plateau and slope soils with gravelly clay and many stones on the soil	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	746,5
		Brogrowi Ri		45	Hill-top, plateau and slope soils with gravelly clay, and locally iron-stone and bauxite at the surface	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	830,7
		Oranje		46	Hill-top, plateau and slope soils with probably stony and gravelly sandy clay loam and sandy clay; many stones and locally bedrock on and at the surface	Neossolo Litólico	Leptosol	690,8
		Amoro		47	Hill-top, plateau and slope soils with probably gravelly clay loam and clay	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa	Chromic Skeletic Ferrasol (Dystric)	758,0
		Mansi		48	Plateau, hill-top and slope soils with probably gravelly and stony clay loam and clay; locally stony; on the plateaus many stones to continuous iron-stone on and at the surface	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	676,3

Landsforme	Formação	Landscape	Fase	Unidade	Características	Correlação de classes		Área (km ²)
						SiBCS	WRB	
MOUNTAINOUS LAND (>50%; >300 M + NSP)		Wilhemina		49	Mountain-top and slope soils with probably gravelly and stony sandy clay loam and sandy clay; many stones and locally bedrocks on and at the surface	Neossolo Litólico	Leptosol	10750
		Balhuis		50	Plateau, mountain-top and slope soils with probably gravelly and stony clay; many stones to continuous iron-stone and bauxite on and at the surface	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	2394,9
		Avanavero		51	Mountain-top, plateau and slope soils with gravelly and stony silt clay and clay; very stony to continuous iron-stone at the surface	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	1232,2
		Brokolonko		52	Plateau, mountain-top and slope soils with gravelly and stony clay loam and silt clay; on the plateaus iron-stone and bauxite at the surface	Plintossolo Pétrico Concrecionário	Petric Plinthosol	1688,0

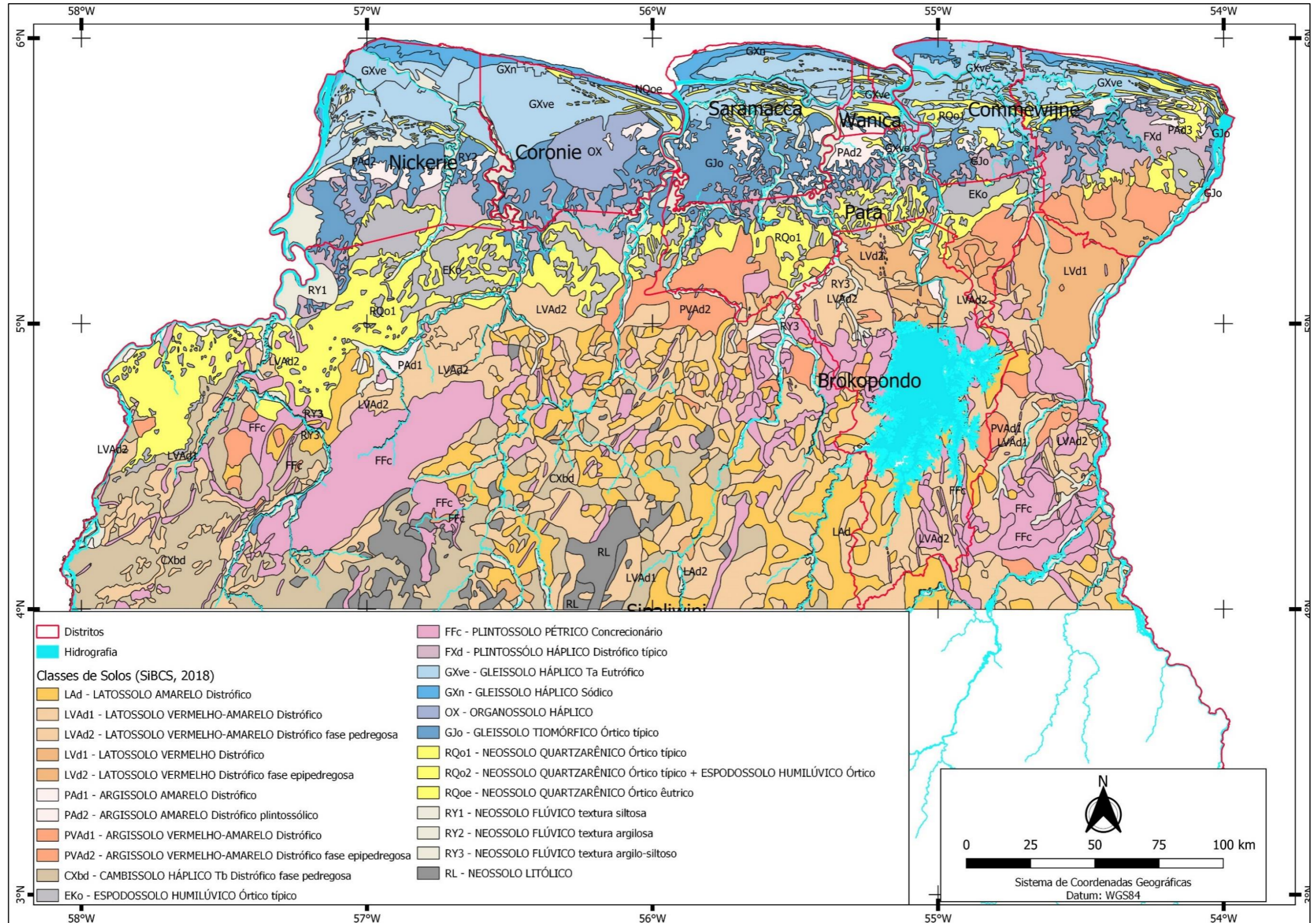


Figura 5. Principais classes de solos da região norte do Suriname segundo o SiBCS (Embrapa, 2018). O mapeamento foi baseado no mapa de Reconhecimento de solos da região norte do Suriname na escala 1:500.000, elaborado por De Boer (1978).

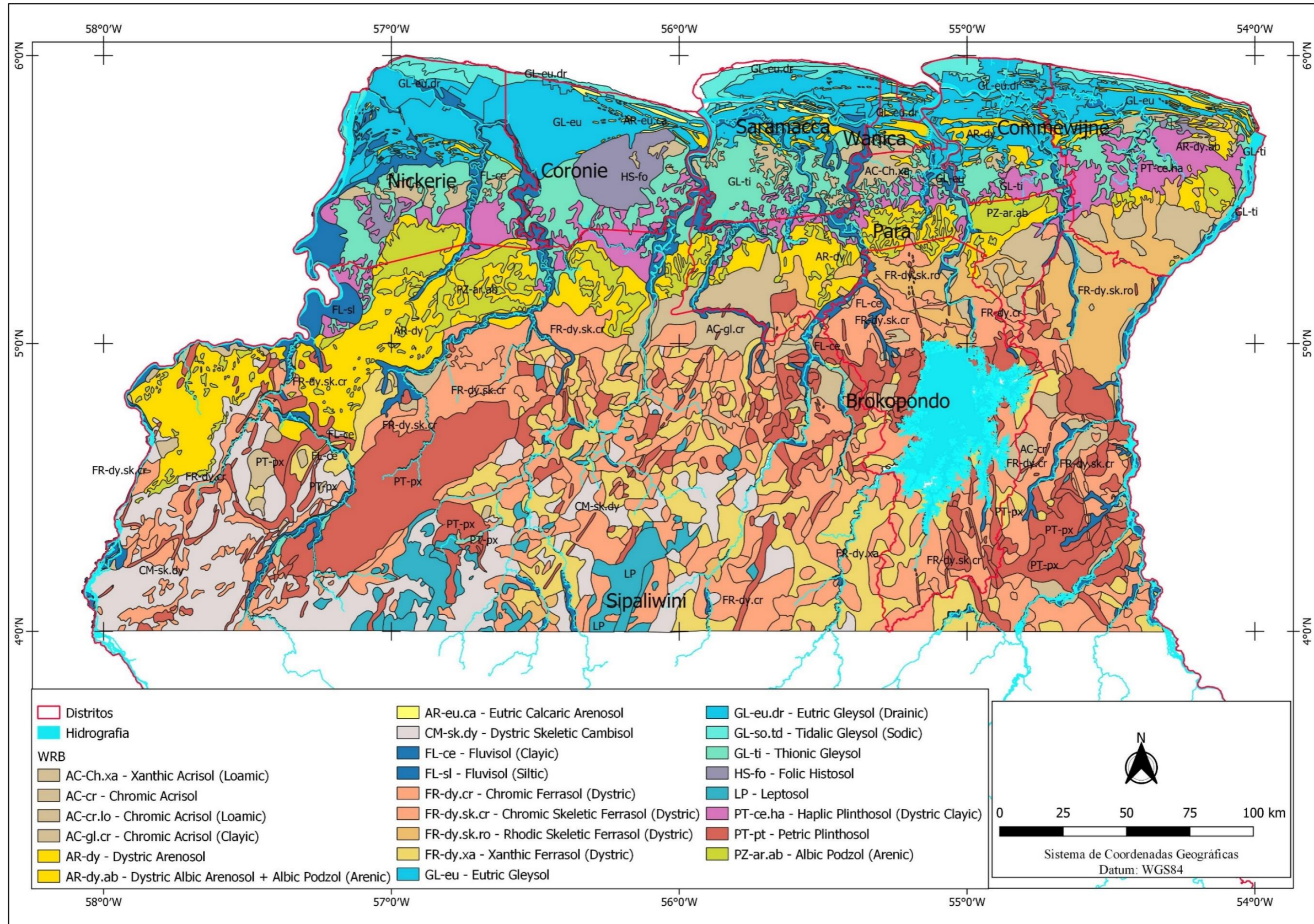


Figura 6. Principais classes de solos da região norte do Suriname segundo a WRB (WRB, 2014). O mapeamento foi baseado no mapa de Reconhecimento de solos da região norte do Suriname na escala 1:500.000 e elaborado por De Boer (1978).

3.2. Características dos solos em cada geoambiente

3.2.1. Planície Costeira Jovem

Grande parte da Planície Costeira Jovem, cerca de 39%, ocorrem os Gleissolos Háplicos Ta Eutrófico (Eutric Gleysol) (GXve), sendo identificados em toda costa, em altitudes entre 0 a 10 metros ao nível do mar (Figura 7 e 8). Os GXve estão associados às unidades 4, 6, 7, 11 e 12 do SiSCS (Tabela 1 e 2). Estes solos ocorrem principalmente nos ambientes mal drenados com formação de pântanos dessalinizados, em grande parte do ano, com relevo plano a suave ondulado (De Boer, 1979; Ouboter, 1993). Possuem acidez elevada ou muito elevada (pH entre 4 e 5), sendo argilosos ou muito argilosos, com argila de atividade alta (Ta). São eutróficos na sua grande maioria (SB > 50 %) (com exceção dos perfis P6 e P9, localizados nas regiões ao leste), com alto teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg) e microelementos (B, Cu, Mn, Fe, Zn) e baixos teores de metais pesados (Cr, Ni, Cd, Pb), e de Na (<200 mg dm⁻³ e ISNA < 6%) (P3, P14, P16 e P17 - Tabela 3, 4 e 5). A mineralogia da fração argila dos Gleissolos em geral localizados em toda costa é similar, com argilas do tipo 2:1 (esmectita) do tipo 1:1 (caulinita), mica (Ilita) e óxidos ferro (goethita) e alumínio (gibbsita) (Figura 9). Slager e Van Schuylenborgh, (1970) também demonstraram essa mesma composição mineralógica em perfis de solos na região central do país.

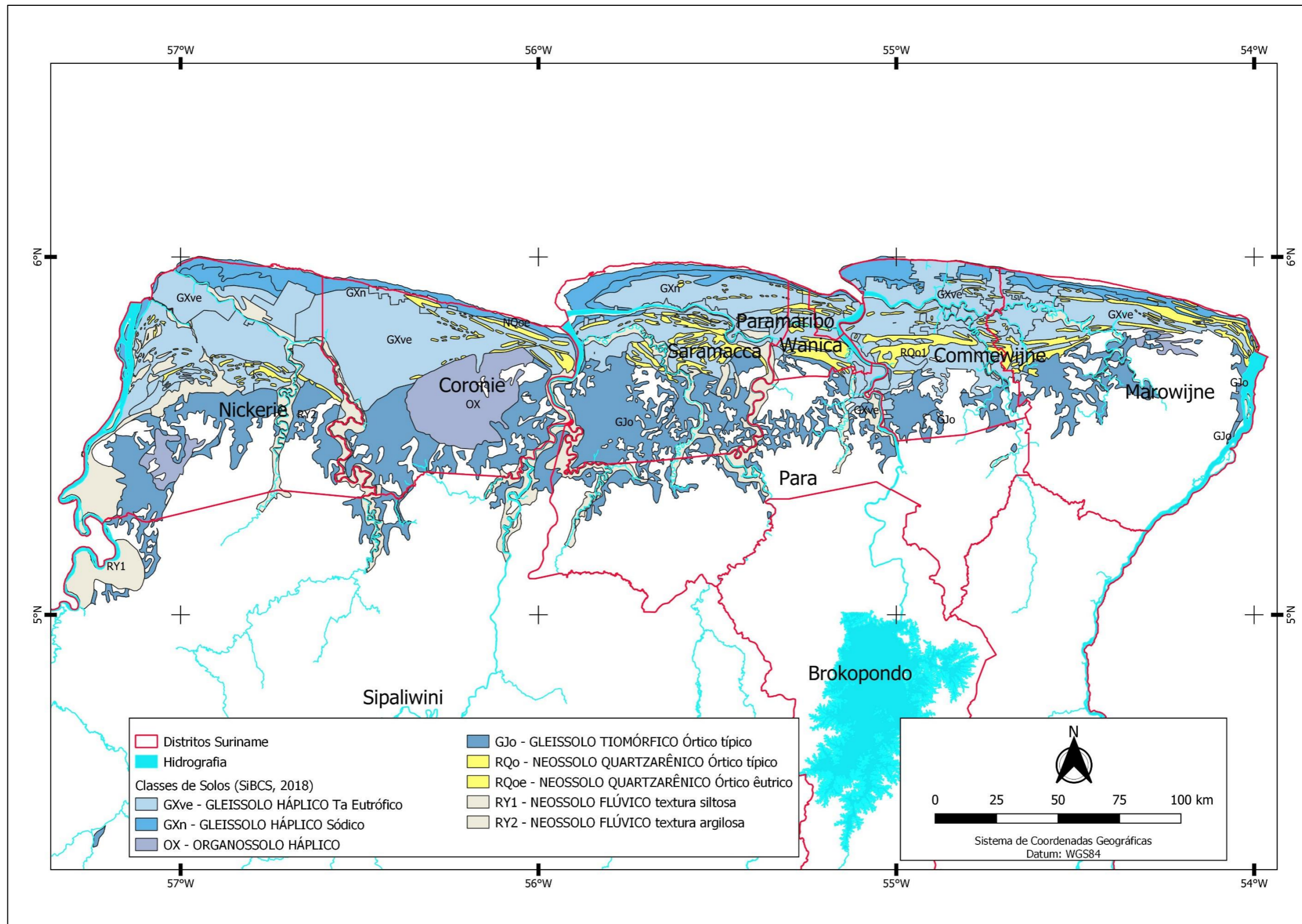


Figura 7. Solos da Planície Costeira Jovem do Suriname classificados no SiBCS (Embrapa. 2018).

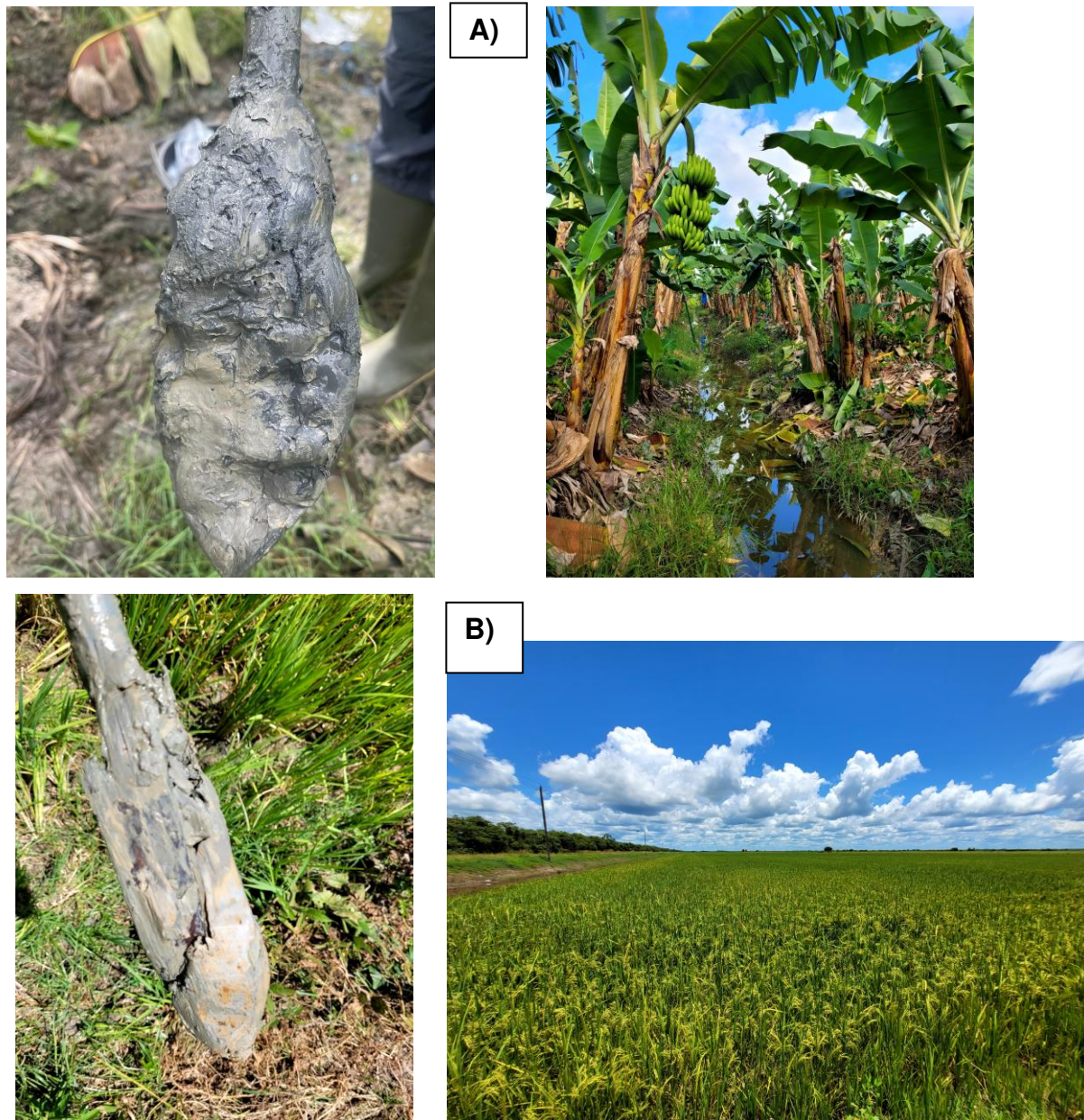


Figura 8. Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos em ambientes mal drenados com cultivo de banana em Jarikaba - Saramacca (A) e arroz em Nicherie (B).

Tabela 3. Propriedades físicas dos solos coletados na Planície Costeira Jovem

Prof.	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	Classe textural
	Grossa	Fina				
---cm---	dag kg ⁻¹					
P3 - Gleissolo Háplico Ta Eutrófico típico						
0-15	0,6	3,0	61,7	34,7	1,78	Franco-Argilo-Siltosa
15-30	2,4	4,8	57,1	35,7	1,60	Franco-Argilo-Siltosa
30-45	0,8	5,3	53,1	40,8	1,30	Argilo-Siltosa
45-60	0,9	6,2	44,6	48,3	0,92	Argilo-Siltosa
60-75	0,5	6,0	56,2	37,3	1,51	Franco-Argilo-Siltosa
75-90	0,4	12	39,0	48,6	0,80	Argila

Prof.	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	Classe textural
	Grossa	Fina				
---cm---	dag kg ⁻¹					
P4 - Neossolo Quartzarênico Órtico típico						
0-15	16,8	66,6	3,7	13,0	0,28	Areia Franca
15-30	16,4	70,4	3,0	10,3	0,29	Areia Franca
P5 - Neossolo Quartzarênico Órtico Eutríco psamítico carbonático						
10	59,5	34,9	0,4	5,2	0,08	Areia
60	67,9	24,9	3,2	4,1	0,78	Areia
P6 - Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico						
0-15	1,7	2,5	49,9	45,9	1,09	Argilo-Siltosa
15-30	1,2	2,1	49,9	46,9	1,06	Argilo-Siltosa
30-45	0,9	2,0	40,9	56,2	0,73	Argilo-Siltosa
45-60	1,4	2,0	41,8	54,8	0,76	Argilo-Siltosa
P7 – Gleissolo Háptico Sódico típico						
0-20	0,8	0,5	25,1	73,6	0,34	Muito Argilosa
20-40	0,4	0,4	23,5	75,7	0,31	Muito Argilosa
40-80	0,2	0,5	24,7	74,6	0,33	Muito Argilosa
P9 - Gleissolo Háptico Ta distrófico						
0-20	24,6	11,9	26,3	37,2	0,71	Franco-Argilosa
20-40	9,4	20,8	34,7	35,1	0,99	Franco-Argilosa
40-60	1,5	3,1	59,0	36,5	1,62	Franco-Argilo-Siltosa
60-80	0,7	0,9	28,2	70,2	0,40	Muito Argilosa
P14 – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico						
0-20	0,3	0,3	17,6	81,8	0,22	Muito Argilosa
20-40	0,2	0,2	22	77,7	0,28	Muito Argilosa
40-60	0,1	0,1	22,8	77,1	0,30	Muito Argilosa
P15 – Argissolo Amarelo Distrófico típico						
0-20	0,4	84,2	8,9	6,5	1,37	Areia Franca
20-40	0,3	91,4	1,2	7	0,17	Areia
40-60	2,1	90,1	1,6	6,2	0,26	Areia
60-80	2,2	65,8	7,6	24,4	0,31	Franco-Argilo-Arenosa
P16 – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico						
0-20	0,7	0,7	37,3	61,3	0,61	Muito Argilosa
20-40	0,1	0,3	23,4	76,2	0,31	Muito Argilosa
40-60	0,4	0,3	22,1	77,2	0,29	Muito Argilosa
P17 – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico						
0-20	0,6	1,1	32	66,3	0,48	Muito Argilosa
20-40	0,8	0,9	33,9	64,4	0,53	Muito Argilosa

Tabela 4. Propriedade químicas dos solos coletados na Planície Costeira Jovem

Prof.	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+ Al	t	T	SB	V	m	ISNa	P-Rem mg L ⁻¹	MO dag kg ⁻¹
		mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³					%						
P3 - Gleissolo Háplico Ta Eutrófico típico																
0-15	5,51	1,3	91	150,46	5,72	8,52	0,39	2,7	15,52	17,83	15,13	84,9	2,5	3,67	27,6	0,66
15-30	5,73	0,7	75	187,03	6,09	9,27	0,19	2,2	16,56	18,57	16,37	88,2	1,1	4,38	24	0,53
30-45	5,75	1,1	89	207,35	6,79	9,8	0,19	2,2	17,91	19,92	17,72	89,0	1,1	4,53	26,9	0,66
45-60	5,25	3,7	91	199,23	6,93	9,18	0,58	7,9	17,79	25,11	17,21	68,5	3,3	3,45	20,6	4,94
60-75	5,34	1,1	75	180,94	5,6	7,94	1,46	5,1	15,98	19,62	14,52	74,0	9,1	4,01	17,9	1,32
75-90	5,58	6	93	280,6	6,01	7,82	0,29	12,2	15,58	27,49	15,29	55,6	1,9	4,44	15,9	10,21
P4 - Neossolo Quartzarênico Órtico típico																
0-15	5,55	1,1	61	0	1,04	0,44	0,19	3,2	1,83	4,84	1,64	33,9	10,4	0	26,4	1,32
15-30	5,37	2,1	17	0	0,31	0,09	0,19	1,9	0,63	2,34	0,44	18,8	30,2	0	17,8	0,4
P5 - Neossolo Quartzarênico Órtico êtrico carbonático																
15	7,91	4,1	39	142,33	3,88	0,24	0	0	4,84	4,84	4,84	100	0	12,79	43,8	0,4
60	7,5	12,5	35	56,99	3,61	0,43	0	0,2	4,38	4,58	4,38	95,6	0	5,41	46,7	1,19
P6 - Gleissolo Háplico Tb Distrófico típico																
0-15	4,96	4,1	21	12,29	0,19	0,08	2,24	13,5	2,62	13,88	0,38	2,7	85,5	0,38	3,8	9,22
15-30	4,9	3,2	23	12,29	0,14	0,07	2,92	13,8	3,24	14,12	0,32	2,3	90,1	0,38	2,5	6,26
30-45	4,67	2,9	17	13,00	0,16	0,09	3,6	13	3,89	13,29	0,29	2,2	92,5	0,42	1,2	2,3
45-60	4,91	2,3	13	14,32	0,11	0,16	4,28	10,9	4,65	11,27	0,37	3,3	92	0,55	1,8	2,63
P7 - Gleissolo Háplico Sódico típico																
0-20	5,82	13	3	3,57	8,98	12,57	0,12	5,1	21,57	21,69	26,67	80,9	0,6	0,06	18,8	3,14
20-40	5,52	5,6	207	1.380,85	6,44	14,37	0,06	2,9	27,34	27,4	30,24	90,4	0,2	19,85	14,5	1,04
40-80	5,64	4,2	203	1.431,5	7,77	13,74	0	2,5	28,25	28,25	30,75	91,9	0	20,24	17,3	1,25
P9 - Gleissolo Háplico Ta Distrófico																
0-20	4,71	2,6	43	10,66	0,65	0,48	2,93	9,8	1,29	4,22	11,09	11,6	69,4	0,42	2,8	3,55
20-40	4,75	3,9	25	4,58	0,14	0,14	3,65	9,5	0,36	4,01	9,86	3,7	91	0,2	1,1	2,44
40-60	4,32	3,8	31	9,65	0,12	0,23	5,42	11,3	0,47	5,89	11,77	4	92	0,36	1,9	3,29
60-80	4,25	4,6	55	22,82	0,19	0,67	9,68	17,3	1,1	10,78	18,4	6	89,8	0,54	2	4,06
0-20	4,71	2,6	43	10,66	0,65	0,48	2,93	9,8	1,29	4,22	11,09	11,6	69,4	0,42	2,8	3,55
P14 - Gleissolo Háplico Ta Eutrófico																
0-20	5,37	10,3	279	372,41	8,26	13,12	0,29	5,5	23,71	24	29,21	81,2	1,2	5,54	16,8	2,21
20-40	5,24	4,8	215	613,12	6,86	14,85	0,6	4,5	24,93	25,53	29,43	84,7	2,4	9,06	18	1,34

Prof.	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+ Al	t	T	SB	V	m	ISNa	P- Rem mg L ⁻¹	MO dag kg ⁻¹
		mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³						%					
40-60	5,15	15,3	178	130,73	8,74	12,21	1,74	7,7	21,97	23,71	29,67	74	7,3	1,92	16	2,23
P15 – Argissolo Amarelo Distrófico típico																
0-20	5,05	4,4	31	22,82	0,81	0,12	0,37	4,5	1,11	1,48	5,61	19,8	25	1,77	25,6	2,27
20-40	5,13	3	7	7,62	0,82	0	0,16	1,7	0,87	1,03	2,57	33,9	15,5	1,29	41,9	0,63
40-60	5,68	1,1	3	3,57	0,78	0	0	0,6	0,8	0,8	1,4	57,1	0	1,11	49,5	0,11
60-80	4,91	1,7	11	6,61	0,19	0,17	2,4	4,1	0,42	2,82	4,52	9,3	85,1	0,64	14,4	0,35
P16 – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico																
0-20	7,35	101,5	1,174	47,13	15,76	9,91	0	1,3	28,89	28,89	30,19	95,7	0	0,68	23,9	3,6
20-40	6,24	24,5	577	26,87	12,81	11,54	0,16	5	25,95	26,11	30,95	83,8	0,6	0,38	19,5	2,08
40-60	5,93	5,1	160	118,57	10,36	15,5	0,16	4,2	26,79	26,95	30,99	86,4	0,6	1,66	22,6	1,41
P17 – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico																
0-20	7,15	24,5	162	271,1	15,89	11,54	0	0	29,02	29,02	29,02	100	0	4,06	13,7	1,35
20-40	7,26	44,6	180	377,47	14,29	12,73	0	0	29,12	29,12	29,12	100	0	5,64	17,6	1,01

Tabela 5. Concentração dos microelementos e metais pesados dos perfis de solos coletados na Planície Costeira Jovem

Prof.	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
---cm---	emolc kg ⁻¹									
P3 - Gleissolo Háptico Ta Eutrófico típico										
0-15	-	-	-	-	-	-	0,39	1,37	0,53	2,05
15-30	-	-	-	-	-	-	0,38	1,55	0,56	2,27
30-45	-	-	-	-	-	-	0,35	1,62	0,61	1,96
45-60	-	-	-	-	-	-	0,47	2,38	0,58	2,58
60-75	-	-	-	-	-	-	0,55	2,07	0,65	1,99
P4 - Neossolo Quatzarênico Órtico típico										
0-15	-	-	1,28	4,6	368,6	2,77	0,28	0,95	0,36	1,7
15-30	-	-	0,32	6,2	120,1	1,2	0,31	0,88	0,36	1,65
P5 - Neossolo Quatzarênico Órtico êtrico carbonático										
0-15	-	-	0,51	20	46	0,54	0,69	2	0,8	0,56
60	-	-	0,67	5,1	55,7	0,8	0,68	1,53	0,59	1,48
P6 - Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico										
0-15	-	-	-	-	-	-	0,76	1,31	0,63	1,45
15-30	-	-	-	-	-	-	0,8	1,35	0,6	2,04
30-45	-	-	-	-	-	-	0,76	1,49	0,6	2,35
45-60	-	-	-	-	-	-	0,63	1,38	0,59	2,58
P7 - Gleissolo Háptico Sódico típico										
0-20	40,7	0,65	1,87	37,1	258	7,81	0	1,3	0	3,52
20-40	221,8	0,07	1,55	24,4	91,1	3,86	0	0,73	0,2	0,99
40-80	141,7	0,19	1,69	20,5	94,9	3,31	0	0,65	0,06	1,13
P9 - Gleissolo Háptico Ta Distrófico										
0-20	19,5	0,31	1,78	15,6	224	6,27	0	0,18	0,19	0
20-40	124,3	0,3	2,15	3,3	170,4	2,6	0,06	0,24	0,21	1,46
40-60	130,7	0,43	2,22	1,8	165,5	0,64	0	0,35	0	1,57
60-80	38,1	0,56	0,71	3,1	84,1	1,6	0	0,63	0	1,29
P14 - Gleissolo Háptico Ta Eutrófico										
0-20	66	0,03	0,70	15,8	107,9	3,39	0	1,42	0	1,57
20-40	140,2	0,72	0,56	7,5	63,9	1,75	0	1,25	0	1,00
40-60	41,5	0,2	0,86	25,8	146,6	4,9	0	1,98	0	1,22
P15 - Argissolo Amarelo Distrófico típico										
0-20	2,6	0,23	0,66	11,6	1.024,3	9,36	0	0,79	0	0,94
20-40	2,1	0,31	0,64	2,9	864,8	3,82	0	0,64	0	0,77
40-60	1,0	0,15	0,56	80,3	218,8	1,19	0	0,49	0	0
60-80	33,2	0,28	0,6	2,1	116,3	0,98	0	0,39	0	0,81
P16 - Gleissolo Háptico Ta Eutrófico										
0-20	2,7	0,02	0,75	98,2	106	8,78	0,13	3,11	0	0,99
20-40	1	0,02	0,79	39,5	163,5	6,14	0	3,78	0	1,21
40-60	15,9	0,02	0,69	30,6	71,4	4,73	0	2,19	0	0
P17 - Gleissolo Háptico Ta Eutrófico - Nikirie										
0-20	34,5	0,36	1,14	177,6	260,8	4,25	0	2	0	0,34
20-40	60,7	0,56	0,93	207,1	130,8	3,18	0	2,03	0	0,93

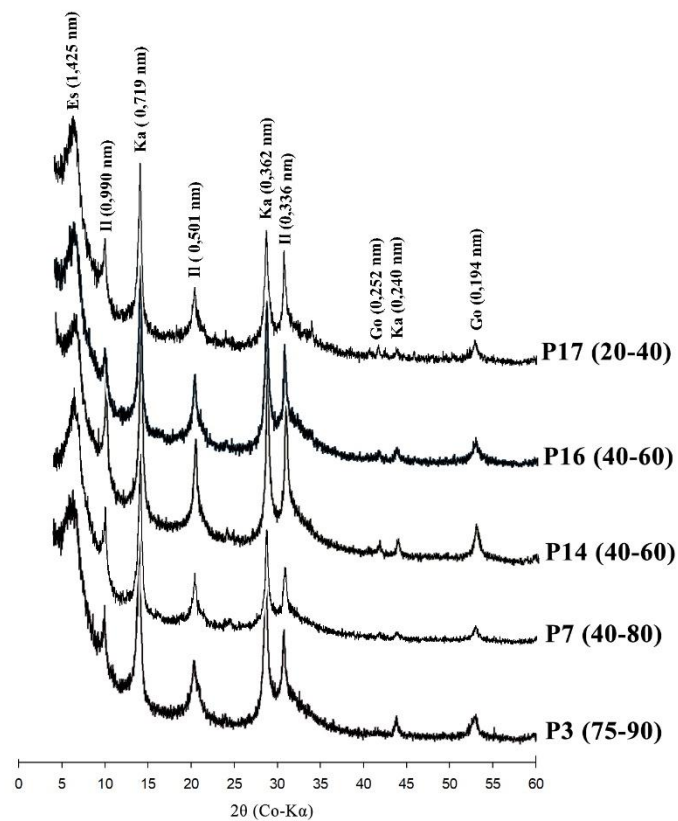


Figura 9. Difratrograma de raios-x da fração argila dos P3, P14, P16 e P17 - Gleissolos Háplicos Ta Eutrófico (Eutric Gleysols) e P7 - Gleissolo Háplico Sódico (Tidalic Gleysol) na Planície Costeira Jovem. Es – Esmectita; Il – Ilita; Ka – Caulinita; Go – Goethita.

Os GXve desenvolveu-se sobre os ambientes com sedimentos de partículas finas inicialmente salinos depositados entre 6.000 a 1.000 atrás, sendo provenientes da bacia do rio Amazonas. A formação dos solos se deu inicialmente com a drenagem, ocorrendo os processos de dessalinização e oxidação, em seguida foram desenvolvidos em solos argilosos, mais ácido e com consistência mais firme (Brinkman e Pons, 1968; Ouboter, 1993). Com relação ao uso desses solos, os GXve normalmente são drenados artificialmente para o cultivo de diversas culturas, sendo as principais o arroz, banana e olerícolas (SBB, 2019).

Os Gleissolos Tiomórficos Órticos típicos (Thionic Gleysol) (GJi) são a segunda classe de maior ocorrência (27%) e estão associados a unidade 16 do SiSCS. Estes solos estão presentes na região mais ao sul da Planície, nos ambientes de pântanos mais baixos e inundados por maior parte do ano por água do mar e doce, sendo esse ambiente conhecido como *Brackish Marshes* (Teunissen, 1993). Estes solos normalmente são eutróficos e argilosos, e possuem baixo pH (<4) com quantidade elevada de pirita (Fe_2S_2) e, quando drenados, podem formar solos tiomórficos ou sulfatados ácidos, com a formação de argilas catiônicas (catclay) (De Boer, 1979; Noordam, 1993). São conhecidos como *Acid Sulfate Soil* comumente encontrados na

região do Caribe, no Planalto das Guianas, no Delta do rio doce com valores de pH normalmente menores que 4 (Ahmad e Wilson, 1992; Lani, 1998).

Os GJi das planícies são formados a partir de depósitos de sedimentos do rio amazônico mais antigos (entre 10.000 e 6.000 atrás), e nesses ambientes pantanosos e mais profundos ocorreu o acúmulo de pirita ao longo dos perfis e turfas na superfície desses solos (Augustinas, 1970). A acidificação dos solos é ocasionada principalmente pela oxidação da pirita, quando estes são drenados (McElnea et al., 2002; Lani, 1998).

Nos terraços, próximos as margens dos principais rios do país, encontram-se os Neossolos Flúvicos (Fluvisols) (RY) que possuem textura siltosa e argilosa, e estão associados aos grupos 9 e 10 do SiBCS, e ocupam 13,5% da área. Estes terraços normalmente possuem menos de 2 km de largura em dois níveis, um a 15 m de altitude de altura ao nível do mar com solos de textura siltosa, e outro a 30 m com solos de textura argilosa. Nesses ambientes onde a drenagem é imperfeita, podem ocorrer inclusões dos Gleissolos.

A região mais ao norte em todo litoral das planícies costeira é formada por Gleissolos Háplico Sódicos (Tidalic Sodic Gleysol) (GXn), e estão associados aos grupos 2 e 3 do SiSCS, com área de 1.331 km² (8,1%) (Figura 10). Os GXn estão localizados em ambientes de pântanos salinos muito mal drenados e frequentemente inundados, com lençol freático a menos de 50 cm da superfície, com pH entre 5 e 6, sendo muito argilosos, com argila de atividade alta (36 a 41 cmolc kg⁻¹), com baixo grau de desenvolvimento e alta quantidade e saturação por sódio ($\text{Na}^+ > 1.400 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{ISNa} > 16\%$) a partir dos 30 cm de profundidade (P7 – Tabela 3,4 e 5). Estes solos são eutróficos ($\text{SB} > 50\%$) com valores elevados de (Ca, Mg, P), micros (B, Cu, Mn, Fe, Zn) e baixos de metais pesados (Cr, Ni, Cd, Pb). Estes solos possuem alto teores de enxofre dissolvido ($> 140 \text{ mg dm}^{-3}$). A mineralogia da fração argila é constituída principalmente por argila 2:1 (Esmectita) e do tipo 1:1 (caulinita), illita e óxidos ferro (Goethita) (P7 - Figura 9). Em algumas áreas, principalmente na região de Margaretha esses solos são utilizados com pastagem, plantio de arroz, e pequenas áreas de agricultura familiar com mandioca e em outras regiões centrais para exploração de petróleo. Entretanto, em muitas áreas principalmente com cultivo de arroz foram abandonadas, devido ao alagamento e alto teor de sódio (SBB, 2019). As práticas de convivência com o ambiente salino, os pequenos agricultores normalmente constroem camalhões utilizando o solo da superfície que possui menor teor de sódio e funcionam como drenagem do excesso de água.



Figura 10. Gleissolo Háplico Sódico próximo ao litoral na região de Magaretha em área abandonada.

A formação dos GXn iniciou-se a partir dos depósitos de sedimentos marinhos finos (entre 1.000 anos atrás), originários da bacia amazônica que foram transportados ao longo da costa sul-americana pelas correntes equatorial sul e residual sul (Pons, 1966; Augustinus e Slager, 1970). A concentração elevada de sódio nesses solos deve-se ao depósito de sais pela subida da maré e pelo spray salino dos mares (De Boer, 1979).

Os Organossolos Háplicos (Folic Histosol) estão presentes em 6% da Planície e estão associados ao grupo 8 do SiSCS. Ocorrem em pântanos alagados por água doce na maior parte do ano, com presença de turfas (De Boer, 1979). São argilosos, com argila de alta atividade, e possuem mais de 18% de carbono orgânico e são classificados como *Peat Soil* pelo SiSCS ou Histosol pela WRB (De Boer, 1979).

Os solos arenosos na Planície Costeira Jovem ocorrem em menor quantidade, cerca de 6,8%. Os solos arenosos podem ser classificados em Neossolo Quatzarênico Órtico típico (Dystric Arenosol) (RQo) (Figura 11) e Neossolo Quatzarênico êutrico carbonático (Calcaric Eutric Arenosol) (RQoe) ricos em conchas (Figura 12). Os RQo estão associados ao grupo 5 e os RQoe ao grupo 1 do SiSCS. Os RQo normalmente são formados em antigas cristas arenosas aplainadas com melhor drenagem, normalmente possuem textura arenosa fina com coloração mais amarelada. Estes solos possuem pH ácido moderado (entre 5,1 e 6), são distróficos com baixa concentração de microelementos, macro elementos e metais pesados (P2, P4 e P11 – Tabela 3, 4 e 5). Estes solos são utilizados principalmente na agricultura e para construções de residências e estradas (Gonini, 2019).



Figura 11. Neossolo Quartzarênico amarelado associados a unidades 8 do SiSCS (A) e de coloração esbranquiçado associados a unidade 14 do SiSCS (B).

Os RQo estão presentes em menor quantidade (1,9%) ao longo de quase toda costa, formando por cristas praias paralelas ao litoral ricas em conchas (Figura 12). Estes solos estão associados a unidade 1 do SiSCS e são classificados como *Calcareus Soil* (Tabela 1 e 2). São bem drenados, com textura arenosa fina e possuem quantidade elevada de conchas calcária, maior que 15% do volume do solo, o que confere elevados teores de cálcio nos horizontes, cerca de $3,6 \text{ cmolc dm}^{-3}$, sendo classificados como eutróficos (P5 – Tabela 3 e 4). Esses solos possuem elevado pH, normalmente maior 7, e que se deve a presença dos altos teores de cálcio que diminui a acidez desses solos. Os RQoe possuem grande importância na construção civil e como fonte de calcário na agricultura no Suriname (De Boer, 1979).



Figura 12. Neossolo Quartzarênico êtrico carbonático com textura arenosa com predomínio de areia grossa com presença de grande quantidade de pequenas conchas.

A formação dos RQoe ocorreu pela acumulação carbonáticas de conchas de animais marinhos que viviam próximo ao mar há mais de 3.000 anos e que foram transportadas e depositadas nos bancos de areias (Augustinus e Slager, 1970). Em alguns locais podem ser encontrados sambaquis e sítios arqueológicos com cerâmicas a céu aberto (Barreto et al., 2015).

3.2.2. Planície Costeira Antiga

Nos ambientes de depósitos de sedimentos mais antigos (mais de 10.000 anos), possibilitou a formação de solos mais intemperizados, como os Plintossolos (Plinthosol), com altitude entre 0 e 10 metros, moderadamente drenados, argilosos, com relevo suave ondulado a ondulado, com a formação de mosqueados, plintitas, petroplintitas e bauxitas (Figura 13). Os Plintossolos podem ser separados nos Plintossolos Háplicos Distróficos típicos (Haplic Clayic Plinthosol) (FXd) e nos Plintossolos Pétricos Concrecionários (Petric Plinthosol) (FFc), e ocorrem em 76,8% da área e estão associados a unidade 16 do SiSCS. Os FXd e FFc possuem argila de atividade baixa (Tb), são distróficos com baixo teor de soma de bases, macro e microelementos e metais pesados (P8 -Tabela 6, 7 e 8). O pH é ácido moderado (entre 5 e 6), e o horizonte B plíntico possui mosqueados e plintitas ao longo do perfil com colorações avermelhada, porém com baixo conteúdo de pirita (Augustinus et al. 1989). Os FFc possuem o horizonte concrecionário com formação principal de bauxita e estão concentrados na região leste no município de Moengo, distrito de Marowijne, nos ambientes onde grande parte foi minerada para extração da bauxita. A mineralogia desses solos é formada em grande parte por caulinita, óxidos de ferro (Goethita) e alumínio (Gibbsita) (Figura 14), como também pode apresentar feldspato e clorita como descrito por Augustinus et al. (1989).

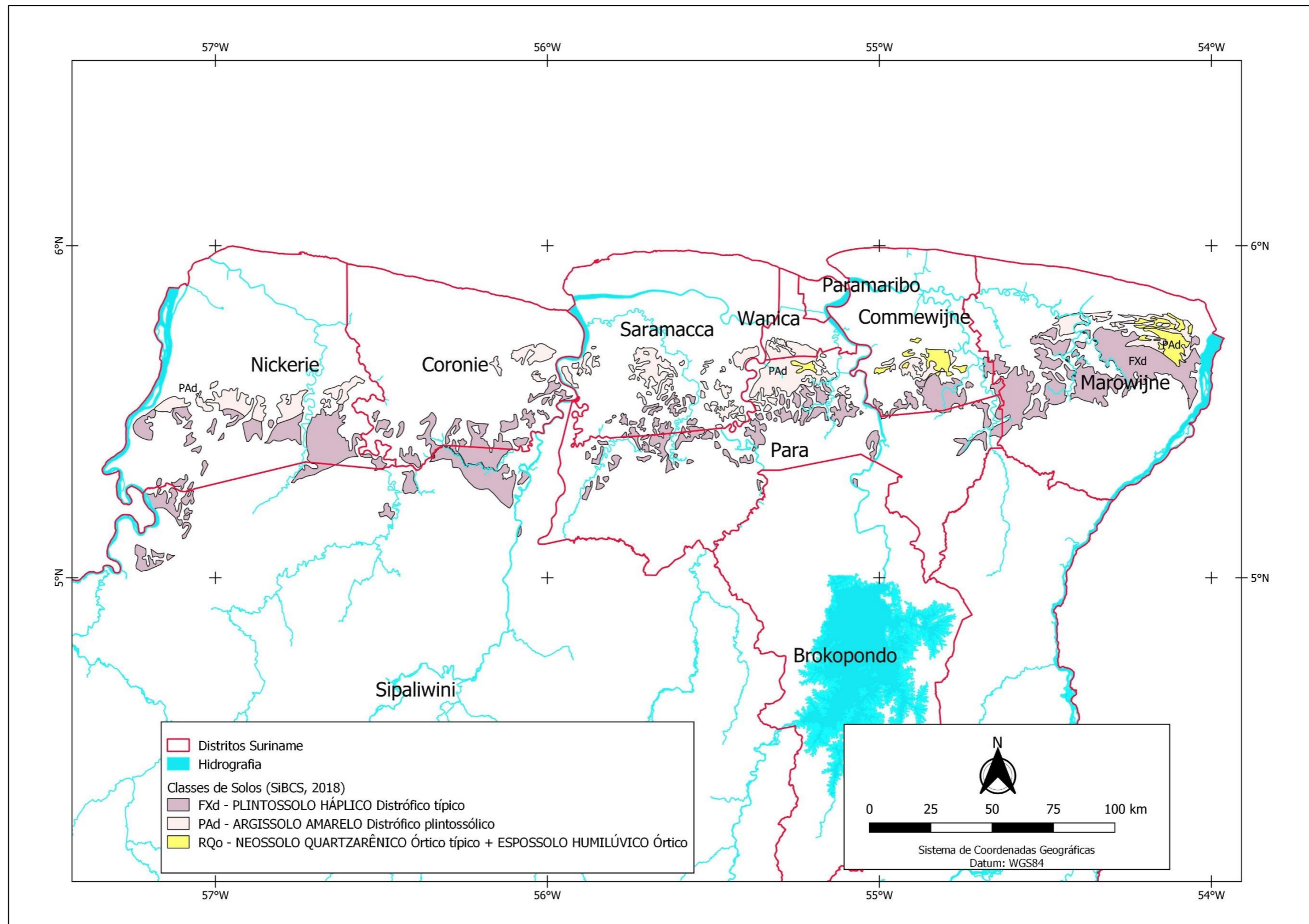


Figura 13. Solos da região da Planície Costeira Antiga do Suriname classificados no SiBCS (Embrapa, 2018).

Tabela 6. Propriedades físicas dos solos coletados na Planície Costeira Antiga

Prof.	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	Classe textural
	Grossa	Fina				
---cm---	dag kg⁻¹					
P1 – Argissolo Amarelo Distrófico típico						
0-15	0,6	66,5	17,7	15,2	1,16	Franco-Arenosa
15-30	0,6	66,9	15,5	17	0,91	Franco-Arenosa
30-45	0,4	64,5	18,7	16,4	1,14	Franco-Arenosa
45-60	0,4	63,4	16,3	19,8	0,82	Franco-Arenosa
60-75	0,5	58,9	13	27,6	0,47	Franco-Argilo-Arenosa
75-90	0,5	69,5	13,4	27,1	0,49	Franco-Argilo-Arenosa
P2 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico						
0-20	0,4	72,4	22,1	5,1	4,33	Franco-Arenosa
20-60	0,4	88,6	10	1,0	10,0	Areia
60-120	0,2	74,2	9,2	16,4	0,56	Franco-Arenosa
P8 – Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico						
10	20,8	5,2	11,5	62,5	0,18	Muito Argilosa
20	16,7	6,9	9,8	66,6	0,15	Muito Argilosa
130	18,5	3,9	15,2	62,3	0,24	Muito Argilosa
P12 – Neossolo Flúvico Tb Eutrófico						
0-14	3,1	55,9	14,3	26,8	0,53	Franco-Argilo-Arenosa
14-39	2,3	62,9	11,2	23,6	0,47	Franco-Argilo-Arenosa
39-70	3,0	60,2	10,8	26,1	0,41	Franco-Argilo-Arenosa
70+	2,9	56,6	12	28,5	0,42	Franco-Argilo-Arenosa
P13 – Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico						
0-20	0,2	82,2	7,8	9,7	0,80	Areia Franca
20-40	0,5	83,8	6	9,8	0,61	Areia Franca
40-60	0,1	78,6	8,8	12,5	0,70	Franco-Arenosa
60-100	0,1	65,3	8,6	26	0,33	Franco-Argilo-Arenosa

Tabela 7. Propriedade químicas dos solos coletados na Planície Costeira Antiga

Prof.	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+ Al	t	T	SB	V	m	ISNa	P-Rem mg L ⁻¹	MO dag kg ⁻¹
		mg dm ⁻³				cmolc dm ⁻³					%					
P1 – Argissolo Amarelo Distrófico típico																
0-15	4,38	9,2	69	12,29	0,78	0,90	2,14	11,4	4,05	13,31	1,91	14,4	52,8	0,4	19,7	5,53
15-30	4,42	7,8	95	28,54	0,56	0,83	2,14	10,0	3,9	11,76	1,76	15	54,9	1,06	19,7	4,48
30-45	4,5	3,2	61	20,42	0,33	0,48	2,72	8,5	3,78	9,56	1,06	11,1	72	0,93	18,0	3,29
45-60	4,52	1,1	19	28,54	0,15	0,18	3,02	6,7	3,52	7,2	0,5	6,9	85,8	1,72	15,6	1,32
60-75	4,44	0	9	28,54	0,12	0,1	3,5	6,1	3,87	6,47	0,37	5,7	90,4	1,92	13,5	0,79
75-90	4,44	0,1	11	32,61	0,11	0,08	3,21	6,1	3,57	6,46	0,36	5,6	89,9	2,19	15,6	0,92
P2 - Neossolo Quartzarênico Órtico típico																
0 - 20	4,62	2,2	33	14,32	0,16	0,12	0,88	6,7	1,31	7,13	0,43	6	67,2	0,87	50,7	4,48
20- 60	4,81	0	1	0	0,1	0,01	0,19	0,8	0,3	0,91	0,11	12,1	63,3	0	54,2	0,4
60-120	4,37	1,8	7	2,13	0,09	0,03	2,53	12,5	2,68	12,65	0,15	1,2	94,4	0,07	6,2	1,98
P8 – Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico																
10	5,13	0,4	13	9,65	0,05	0,04	1,17	8	0,17	1,34	8,17	2,1	87,3	0,51	13,8	4,85
20	4,39	0,5	39	7,62	0,04	0,04	1,5	10,7	0,21	1,71	10,91	1,9	87,7	0,3	3,4	5,76
130	5	0	3	1,54	0,07	0	0,06	1,7	0,08	0,14	1,78	4,5	42,9	0,38	10,2	0,37
P12 – Neossolo Flúvico Tb Eutrófico																
0-14	6,03	1,6	41	14,71	6,78	0,41	0	2,4	7,36	7,36	9,76	75,4	0	0,66	40,7	4
14-39	7,1	0,4	31	8,63	5,37	0,16	0	0,9	5,65	5,65	6,55	86,3	0	0,57	36,1	0,84
39-70	6,93	0,2	39	7,62	5,17	0,39	0	0,6	5,69	5,69	6,29	90,5	0	0,53	32,4	0,37
70+	7	0,5	39	8,63	5,18	1,46	0	0,5	6,78	6,78	7,28	93,1	0	0,52	30,2	0,35
P13 – Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico																
0-20	5,04	61,3	31	5,6	0,56	0,41	0,29	3,9	1,07	1,36	4,97	21,5	21,3	0,49	44,4	3,04
20-40	5,34	93,9	19	3,57	0,38	0,22	0,43	3,3	0,66	1,09	3,96	16,7	39,4	0,39	40,8	1,06
40-60	5,4	33,1	27	3,57	0,24	0,13	0,6	3,2	0,45	1,05	3,65	12,3	57,1	0,43	29,9	0,79
60-80	4,98	17	19	7,62	0,16	0,19	1,72	4,2	0,43	2,15	4,63	9,3	80	0,72	18,1	0,29

Tabela 8. Concentração dos microelementos e metais pesados dos perfis de solos coletados na Planície Costeira Antiga

Prof.	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
---cm---	cmolc kg⁻¹									
P1 – Argissolo Amarelo Distrófico típico										
0-15	-	-	0,55	6,7	507,7	3,25	0,43	1,28	0,44	1,29
15-30	-	-	0,41	3,8	568,6	2,25	0,41	1,32	0,45	1,39
30-45	-	-	0,32	2,3	621,8	1,17	0,43	0,67	0,12	0,69
45-60	-	-	0,28	1,0	431,9	0,36	0,44	1,26	0,43	1,3
60-75	-	-	0,26	0,9	158,3	0,31	0,47	0,78	0,24	2,49
75-90	-	-	0,31	0,6	584	0,24	0,92	0,65	0,23	1,36
P2 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico										
0-20	-	-	0,26	0,5	20,6	0,59	0,17	0,84	0,4	0,34
20-60	-	-	0,27	0	5,4	0,02	0,29	0,83	0,29	0,8
60-120	-	-	0,33	0,8	36,8	0,15	2,22	1,09	0,47	1,43
P8 – Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico										
0-10	8,6	0,32	0,39	0,3	217,7	0,5	0	0	0	0
0-20	4,2	0,45	0,24	3,2	66,5	0	0	0,19	0	0,82
130	102,9	0,15	0,3	0,3	20,8	0	0	0	0	0,14
P12 – Neossolo Flúvico Tb Eutrófico										
0-14	3,3	0,25	0,89	32,7	57,1	2,27	0			
14-39	3,2	0,05	0,72	7,6	80,7	1,1	0	0,41	0	1,14
39-70	2,6	0,07	0,68	7,7	66,1	1,11	0	0,56	0	0,43
70+	3,1	0,03	1,21	20,7	53,9	1,8	0	0,36	0	0
P13 – Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico										
0-20	15,9	0,27	0,65	5,9	61,3	4,06	0	0,25	0	0,24
20-40	15,7	0,23	0,6	3,5	115,1	2,86	0	0,31	0	0
40-60	18,5	0,25	0,51	2,6	279,1	3,1	0	0,04	0	0,36
60-80	19,2	0,3	0,49	1,9	270,2	1,71	0	0,19	0	0,37

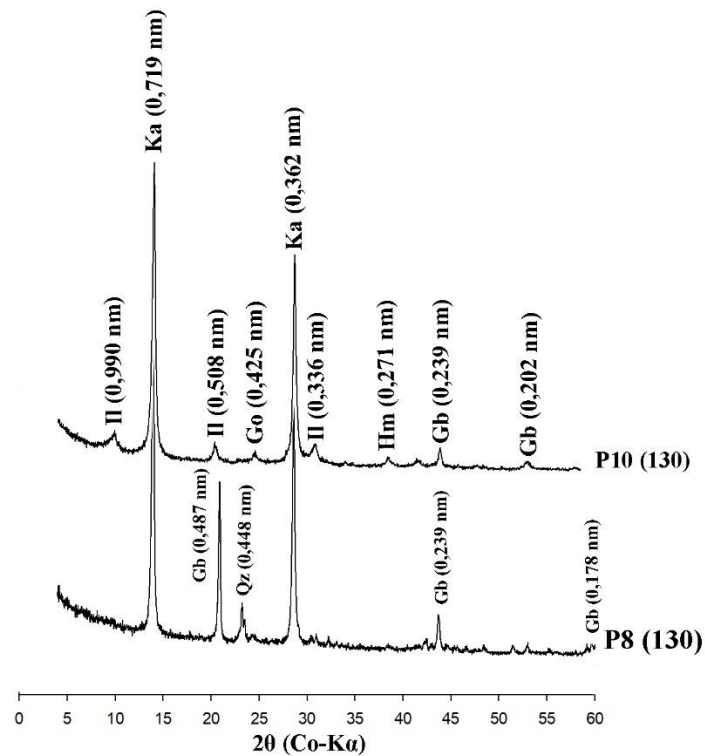


Figura 14. Difratoogramas de raios-x da fração argila do P8 - Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico (Petric Plinthosol) e P10 - Latossolo Vermelho Distrófico típico fase epipedregosa (Rhodic Skeletic Ferrasol (Dystric)). Il – Ilita; Ka – Caulinita; Hm – Hematita; QZ – Quartzo; Gb – Gibbsita; Go – Goethita.

Os Plintossolos foram formados a partir de sedimentos fluviais, depositados sob uma vegetação de mangue do gênero *Avicennia*, com menor influência de água do mar e menor conteúdo de pirita. E por estar próximo a ambientes mais alagados possibilitou maior flutuação do lençol freático formando as plintitas (Augustinus et al., 1989). Os Plintossolos Háplicos normalmente possuem pouco uso agrícola, coberto principalmente por vegetação primária. Já os Plintossolos Pétricos Concrecionários, parte encontra-se em locais com vegetação primária e em grande parte encontra-se em área onde foram intensamente minerados para exploração da bauxita desde 1916 (Figura 15).



Figura 15. Plintossolo Pétrico Concrecionário, com presença de concreções de bauxita na região de Marowijne.

Na Planície Costeira Antiga os solos arenosos também são encontrados, os Neossolos Quartzarênicos órticos (RQo) em antigas cristas litorâneas aplainadas localizados em áreas um pouco mais elevadas com melhor drenagem e com predomínio de areia fina e coloração mais esbranquiçada até os 60 cm, com mudança para coloração amarela a partir dos 60 cm de profundidade, e estão associadas ao grupo 14 do SiSCS. Estes solos quando ocorrem nos ambientes mais planos com menor drenagem, com alagamento sazonal com formação do B espódico com concentração de óxidos de ferro e compostos orgânico em profundidade, forma os Espodossolos Humilúvicos órticos (EKo). Os EKo em algumas áreas devido seu lençol freático mais alto são utilizados principalmente com pastagem e os RQo normalmente deixados como vegetação nativa.

Os Argissolos Amarelo Distróficos estão presentes em menor quantidade, cerca de 7,4% (Tabela 1). Normalmente são formados em locais onde houve depósito de materiais arenosos finos sobre materiais mais argilosos, e estão associados a unidade 15 SiSCS. Possuem horizonte B textural com profundidade maior que 60 cm, com coloração amarelada (10 YR), com textura média, sendo distróficos com baixa saturação por base, baixos teores de macro e microelementos e metais pesado, e possuem alta saturação por alumínio e acidez média com valores de pH entre 4-5 (P1, P13 e P15). A mineralogia da fração argila é constituída

principalmente por minerais do tipo 1:1 caulinita, óxidos de ferro (goethita), mas possui minerais do tipo 2:1 (esmectita) e illita e quartzo (Figura 16). Os PAd plintossólicos estão associados a locais onde ocorre a flutuação do lençol freático, e este encontra-se normalmente a 1 metro de profundidade, o que permite a formação de mosqueados e plintitas. Também associado a unidade 15 do SiSCS, pode ocorrer em locais mal drenados, com lençol freático a menos de 70 cm e formação do horizonte B espódico a formação dos Espodosolos Húmiluvicos.

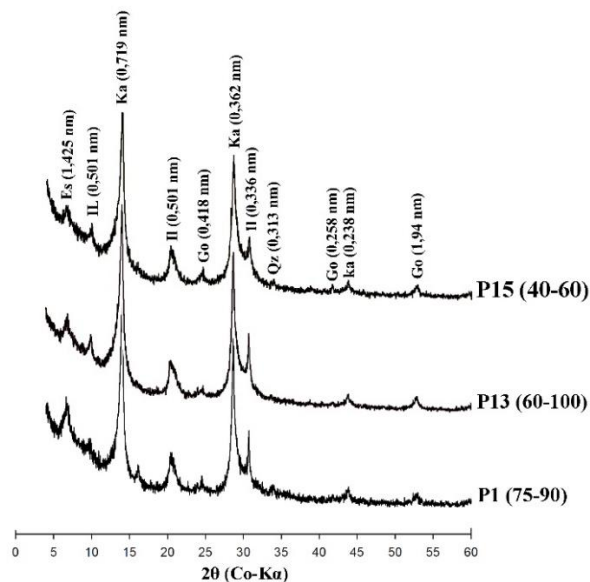


Figura 16. Difratograma de raios-X da fração argila do P1 e P13, P15 – Argissolo Amarelo Distrófico. Es – Esmectita; Il – Illita; Ka – Caulinita; Go – Goethita; Qz - Quartzo.

3.2.3. Cobertura Savânica

Nesse geoambiente pode ser identificados a ocorrência de duas classes de solos arenosos, os Espodosolos Humilúvico Órtico (Albic Arenic Podzol) (EKO) e os Neossolos Quartzarênicos Órticos típicos (Dystrict Arenosol) (RQo) (Figura 17 e 18; Tabela 9,10 e 11). Esses solos ocorrem em relevo suave ondulado a ondulado com declividade menor que 16%. Os EKO possuem textura de areia fina com coloração esbranquiçada com formação do B espódico em profundidades maiores que 1,5 metros (P18 e P27 – Apêndice A), e estão associados aos grupos 19 e 26 do SiSCS. Estes solos estão presentes em ambientes de savanas, com presença de gramíneas e pequenos arbustos (Hook, 1971; Heyligers,1963), e possuem características semelhantes as campinarana na Amazônia brasileira com predomínio de Espodosolos e Neossolo Quartzarênicos (Mendonça et al., 2015). Os RQo possuem textura de areia média a grossa com coloração mais amarelada (10 YR), e normalmente com vegetação de porte mais arbóreo e estão associados aos grupos 20 e 27 do SiSCS. Fazem parte da formação

Zanderij, formada por depósitos de sedimentos arenosos do Plioceno, resultado do intemperismo das rochas ígneas e sedimentares do Pré-cambriano do interior do país (Janssem, 1990).

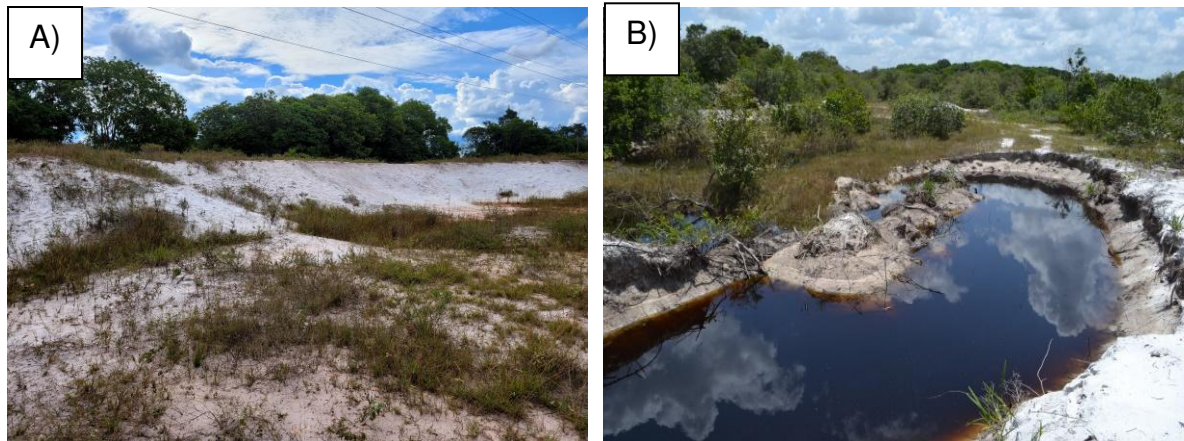


Figura 17. Neossolo Quartzarênico (A) e Espodossolos Humilúvico com presença de lençol freático a 1,5 metros em ambiente savânico de Campinarana (B).

O principal processo de formação dos EKO no Suriname foi pela iluviação dos óxidos de ferro e alumínio e da matéria orgânica das camadas superficiais para as subsuperficiais, formando o horizonte B espódico (Van Der Voorde, 1965; Krook e Mulders, 1971; Bennema, 1982).

A vegetação nativa é o principal elemento para distinguir esses solos, seguida pela granulometria da areia. Porém, nos locais onde a vegetação original foi removida pode ocorrer dificuldades de separá-los. A presença do horizonte B espódico ocasiona acúmulo de água em superfície no período chuvoso em razão do impedimento que ele ocasiona para a infiltração da água, o que já não ocorre nos RQo (Oliveira et al., 2010). Outra forma de distingui-los com maior assertividade seria com o uso de ferramentas geofísicas, como o radar de penetração do solo (Abreu, 2017).

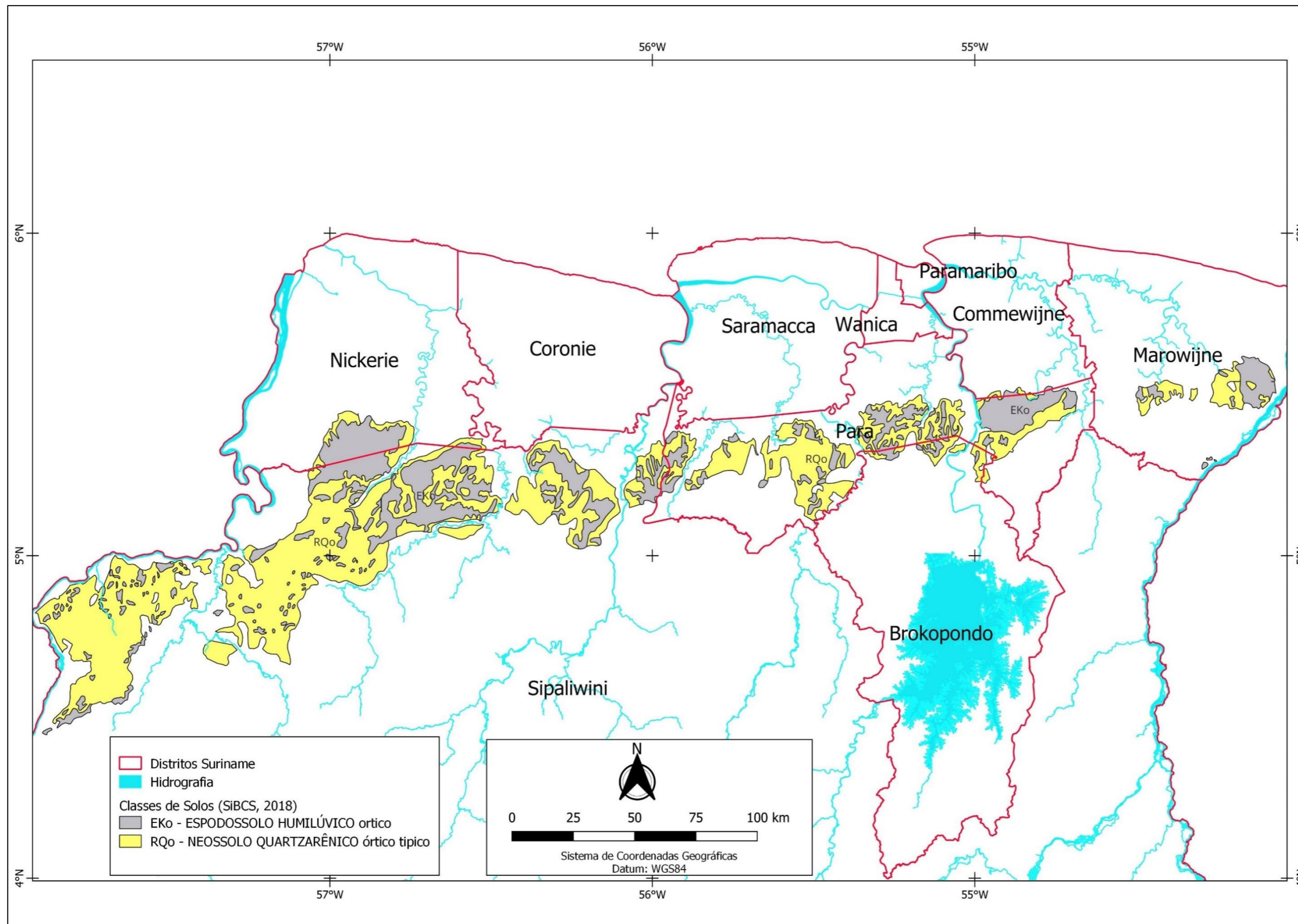


Figura 18. Solos da região da Cobertura Savânica do Suriname, classificados com o SiBCS.

Tabela 9. Propriedades físicas dos solos coletados na Cobertura Savânica

Prof.	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	Classe textural
	Grossa	Fina				
---cm---	dag kg ⁻¹					
P11 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico						
0-20	88	4,9	1,5	5,6	0,27	Areia
100	85	10	0,7	4,3	0,16	Areia
200	73,7	21,8	0,8	3,8	0,21	Areia

Tabela 10. Propriedade químicas dos solos coletados na Cobertura Savânica

Prof.	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ Al	T	T	SB	V	m	ISNa	P-Rem (mg L ⁻¹)	MO (dag kg ⁻¹)
		mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³					%						
P11 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico																
0-20	4,92	4,7	43	17,7	0,78	0,24	0,41	4,7	1,21	1,6	5,91	20,5	25,3	1,31	59,9	3,19
100	5,02	1,2	9	0,53	0,27	0,06	0,06	1,5	0,36	0,4	1,86	19,4	14,3	0,12	56,5	0,88
200	5,89	0,2	0	0	0,01	0	0	0,3	0,01	0,0	0,31	3,2	0	0	58,4	0

Tabela 11. Concentração dos microelementos e metais pesados dos perfis de solos coletados na Cobertura Savânica

Prof.	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
---cm---	cmolc kg ⁻¹									
P11 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico										
0-20	3,4	0,33	0,28	5,8	27,6	1,18	0	0,1	0	0
100	3,1	0,16	0,23	2,0	20,2	0,42	0	0,44	0	0
00	1,0	0,13	0,26	0,3	3,8	0	0,02	1,05	0	0,67

3.2.4. Interior - Parte Alta

Os solos desse geoambiente correspondem a aproximadamente 70% da região norte do Suriname, sendo muito profundos e intemperizados (O’Herne, 1969). Ocorrem em diferentes ambientes, em terras baixas com altitude entre 10 e 100 metros de altitude acima do nível do mar em colinas dissecadas com relevos em planaltos suave ondulado a ondulados, terras moderadamente altas entre 100 e 300 m com relevo forte ondulado a montanhoso e terras altas acima dos 300 metros com relevo montanhoso e escarpado (Ouboter, 1993).

Os principais solos são os Latossolos (Ferrasols), os quais ocorrem em 52% da área, seguido dos Plintossolos (Plinthosols) (19%), Cambissolos (Cambisols) (13%), Argissolos (Acrisols) (8%), Neossolos Flúvicos (Flúvisols) (4%) e Neossolos Litólicos (Entosols) (4%) (Figura 19; Tabela 2).

Os Latossolos podem ser separados em Latossolo Amarelo Distrófico fase pedregosa (Xanthic Skeletic Ferrassol (Dystric)) (LAd), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Chromic Ferrassol) (LVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico fase pedregosa (Chromic Skeletic Ferrassol (Dystric)) (LVAd), Latossolo Vermelho Distrófico fase pedregosa (Chromic Ferrassol (Dystric)) (LVd).

Os LAd fase pedregosa encontram-se normalmente em áreas de menor altitude, entre 10 e 100 metros, com relevo ondulado e dissecados, e em área moderadamente altas (entre 100 e 300 m) com relevo forte ondulado e montanhoso e ocorrem principalmente sobre os granitoides Gran Rio e Leucogranito (Kroonenberg et al., 2016) e estão associados às unidades 31 e 42 do SiSCS.

Os LVAd ocorrem em ambientes de planaltos, encostas e topo de morros com altitudes entre 10 e 300 metros. Os LVAd podem ter a fase pedregosa que ocorrem em maior quantidade em terras baixas (entre 10 e 100 m) em relevos fortes ondulados com presença de cascalhos e calhaus, e estão associados às unidades 35, 36, 43 e 44 do SiSCS.

Os LVd ocorrem normalmente em áreas de menor altitude entre 10 e 100 m, em relevo suave ondulado a ondulado. Estes solos ocorrem sobre as rochas do tipo xisto Taffra do *Greentone Belt* na região noroeste do Suriname (Kroonenberg et al., 2016), e estão associados a unidade 32 do SiSCS. Esses solos possuem lateritas ricas em caulinitas e gibbissita e são classificados também pelo SiSCS como *Clayey Dry Red kaulinitic Soil* (De Boer, 1979) (Figura 20; Tabela 12,13 e 14). Sobre esses solos ocorrem as principais áreas de mineração de ouro, principalmente por escavação mecânica.

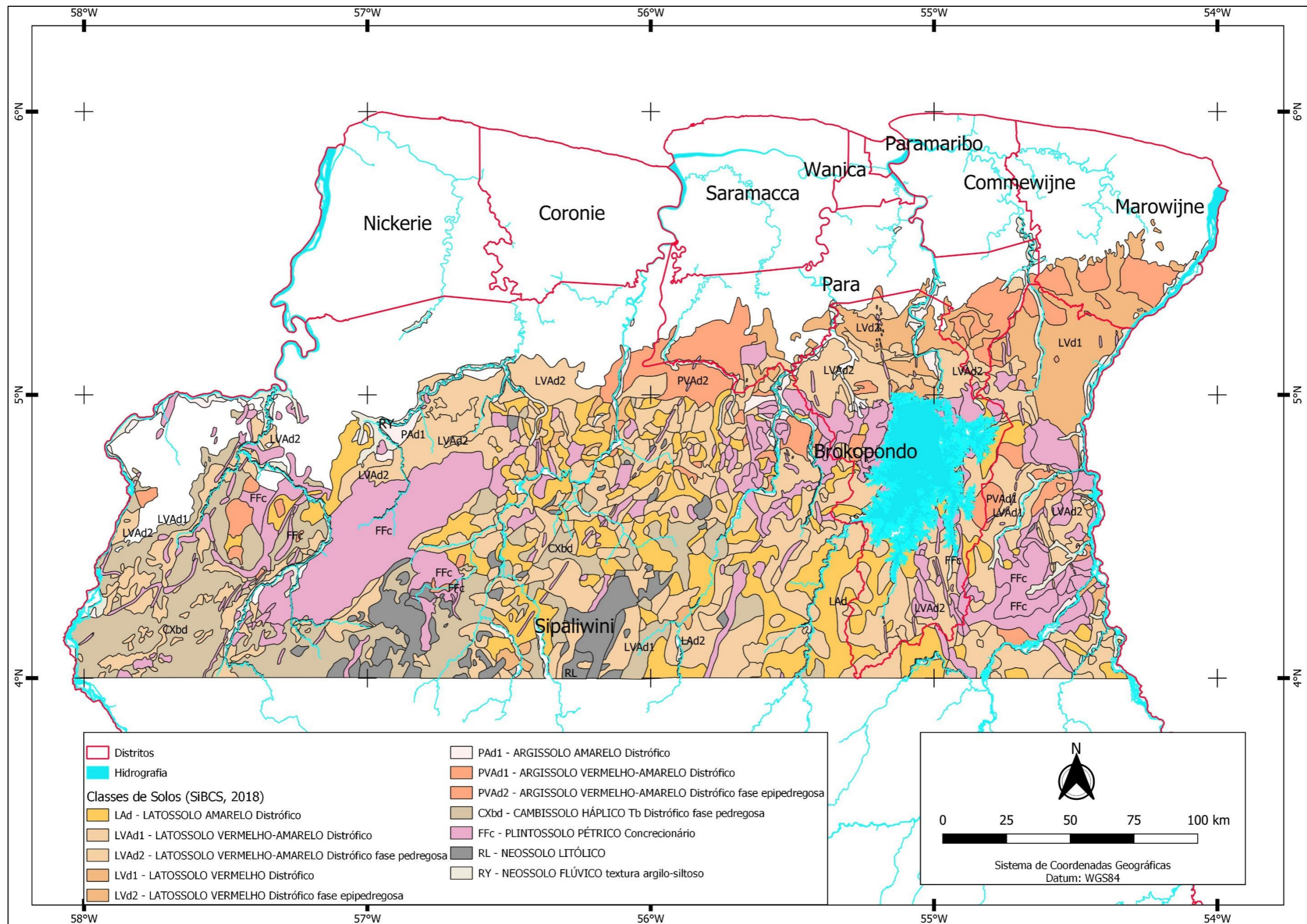


Figura 19. Solos do interior e parte alta do Suriname classificados com o SiBCS.



Figura 20. Latossolo Vermelho Distrófico na região do interior em relevo ondulado com vegetação arbórea densa referente ao perfil 10.

Tabela 12. Propriedades físicas dos solos coletados no Interior – Parte alta

Prof.	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	Classe textural
	Grossa	Fina				
---cm---	dag kg ⁻¹					
P10 - Latossolo Vermelho Distrófico típico fase epipedregosa						
10	0,2	0,1	21,4	78,3	0,27	Muito Argilosa
60	18,7	6	16,1	59,2	0,27	Argila
80	12,3	4,9	20,1	62,7	0,32	Muito Argilosa
130	3,6	3,8	34,5	58,2	0,59	Argila

Tabela 13. Propriedade químicas dos solos coletados no Interior – Parte alta

Prof.	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ Al	T	T	SB	V	m	ISNa	P-Rem (mg L ⁻¹)	MO (dag kg ⁻¹)
		mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³					%						
P10 - Latossolo Vermelho Distrófico típico fase epipedregosa																
10	5,2	0	23	6,0	1,35	0,70	0,52	3,7	2,10	2,8	5,80	37,0	22,0	0,62	13,3	1,62
60	5	0	25	7,6	1,33	0,66	0,51	3,6	2,09	2,6	5,69	36,7	19,6	0,58	12,6	1,58
80	4,94	0	35	3,5	0,45	0,36	0,76	3,2	0,92	1,6	4,12	22,3	45,2	0,38	6,4	0,45
130	4,9	0	21	1,5	0,12	0,18	1,19	3	0,36	1,5	3,36	10,7	76,8	0,2	4,1	0,3

Tabela 14. Concentração dos microelementos e metais pesados dos perfis de solos coletados no Interior – Parte alta

Prof.	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
---cm---	cmolc kg⁻¹									
P10 - Latossolo Vermelho Distrófico típico fase epipedregosa										
10	12,2	0,31	0,60	1,7	40	0,60	0	0	0	0
60	13,8	0,34	0,65	1,8	42	0,59	0	0	0	0,01
80	65,8	0,31	0,36	0,3	33,3	0	0	0	0	0
0	85,3	0,24	0,31	0,1	34,6	0,07	0	0	0	0

Os Plintossolos Pétricos concrecionário ocorrem em ambientes desde áreas baixas a áreas altas (10 a 300 m), em relevos de suave ondulado a montanhoso a planaltos. Porém maior parte desses solos ocorrem em ambientes de planaltos em topo dos morros com formação de grande quantidade de petroplintitas e bauxitas (O’Herne, 1969). Estes solos são considerados os mais antigos, sendo do período entre o Terciário e Pleistoceno ocorrendo principalmente sobre a geologias de gnaiss do *Greenstone Belt* (associação de rochas metavulcânicas e metassedimentares) (unidade 50 - SiSCS), e sobre rochas máficas (unidades 30, 39, 48, 51, 52 do SiSCS), nos diques de diabásio em altitudes maiores que 200 metros (unidade 37 do SiSCS) (Kroonenberg et al., 2016).

Os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos são encontrados principalmente em terras baixas em altitudes entre 10 e 100 metros em relevos suaves ondulado a ondulado, com a presença de argila acumulada nos horizontes subsuperficial. Essa acumulação de argila se deu pelo processo de iluviação de argila (lessivagem), que ocorreu provavelmente em condições mais secas durante o último glacial (De Boer, 1979; Noordam, 1993).

Os Cambissolos Háplicos Tb distróficos fase pedregosa (Dystric Cambisol) estão presentes normalmente entre 100 e 300 metros, em relevo montanhoso e escarpado com declividades maiores que 30%. Esses solos possuem fase pedregosa com quantidade moderada e alta de cascalhos, calhaus e matacões (unidade 40 do SiBCS).

Os Neossolos Flúvicos estão normalmente presentes em ambientes terraços rasos e planos próximos aos rios com altitudes entre 15 e 30 metros onde houve depósito de sedimento mais arenoso (unidade 17 SiSCS).

Os Neossolos Lítólicos ocorrem em menor quantidade e estão presentes em maior parte nas terras altas acima dos 300 metros sobre um relevo montanhoso a escarpado. Esses solos são formados em ambientes muito a extremadamente pedregosos e rochosos, presentes principalmente nas unidades 46 e 49 SiSCS (O’Herne, 1969).

4. CONCLUSÕES

Foi possível correlacionar as principais unidades de solos do SiSCS com os SiBCS e WRB até o quarto nível categórico. O SiBCS pode ser utilizados no Suriname de forma a contribuir para melhor compreensão dos ambientes assim como transferência de conhecimentos pedológicos para melhor planejamento do uso da Terra e dos recursos naturais no país.

REFERÊNCIAS

- ABREU, V.A., Uso de georadar e mapeamento digital de solos no estudo de Mussunungas em áreas do Grupo Barreiras. (Master Thesis). Universidade Federal de Viçosa. 2017.
- AHMAD, N.; WILSON, H.W. Acid sulfate soils of the Caribbean region their occurrence, reclamation, and use. *Soil Science*, 153:154. 1992.
- AUGUSTINUS, P.G.E.F.; HAZELHOFF, L.; KROON, A. The chenier coast of Suriname: modern and geological development. *Marine Geology*, 90: 269-281. 1989.
- BRINKMAN, R.; PONS, L.J. A pedo-geomorphological classification and map of the Holocene sediments in the coastal plain of the three Guianas. *Soil Survey Papers*. 1968.
- DE BOER, M.W.H. Landforms and soils in eastern Surinam. *Agriculture Research Report*, 771: p.162. 1972.
- DE BOER, M.W.H. Reconnaissance soil map of northern Surinam. 1978.
- DE BOER, M.W.H. System of soil classification for Suriname. Wageningen, 1979. 59p.
- GENERAL BUREAU OF STATISTICS (GBS). Demographic data 2015-2018. Paramaribo, Suriname, 2019. Disponível em: <https://statistics-suriname.org/wp-content/uploads/2020/02/Demografische-Statistieken-2015-2018.pdf>.
- HOLBAND, R.G.; THIJM, M.; VAN O.J. Features and problems of land use of the republic of Suriname. *Land management*. p.356-362. 2020.
- IUSS Working Group WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. FAO, Rome, 2014.
- JANSSEN, B.H. Mechanized annual cropping on low fertility acid soils in the humid tropics: a case study of the Zanderij soils in Suriname. Wageningen Agricultural University, 1990. 205p.
- KROONENBERG, S.B.; DE ROEVER, E. W. F.; FRAGA, L. M.; REIS, N. J.; FARACO, T.; LAFON, J. M.; WONG, T. E. Paleoproterozoic evolution of the Guiana Shield in Suriname: A revised model. *Netherlands Journal of Geosciences*, 95: 491-522. 2016.
- LANI, J.L. Deltas dos rios Doce e Itapemirim: Solos, com ênfase nos tiomórficos, água e impacto ambiental do uso. (Thesis). Universidade Federal de Viçosa, 1998. 169p.
- BARRETO, C.; LIMA, H.P.; BETANCOURT, C.J. Análises cerâmicas na arqueologia amazônica: contribuições da Amazônia central a uma longa trajetória de discussões. *Revista de arqueologia*. 2015. 679p.

- MONSELS, D.A.; VAN BERGEN, M.J. Bauxite formation on Proterozoic bedrock of Suriname. *Journal of Geochemical Exploration*, 180:71-90. 2017.
- MCELNEA, A.; AHERN, C.Y.; MENZIES, N. The measurement of actual acidity in acid sulfate soils and the determination of sulfidic acidity in suspension after peroxide oxidation. *Australian Journal of Soil Research*, 40:1133-1157. 2002.
- NOORDAM, D. The geographical outline. In: OUBOTER, P.E. (eds) *The Freshwater Ecosystems of Suriname. Monographiae Biologicae*. Springer, Dordrecht. 1993. 318p.
- O'HERNE, L. A photogeological study of the basal complex of Suriname. *Mededelingen Geologisch Mijnbouwkundige Dienst Suriname*, 20:53-149. 1969.
- PONS, L.J. Occurrence and formation of pyrite in various marine deposits in the Netherlands and explanation of the genesis of the "knip" phenomenon. *International Report*, 2342: 37. 1960.
- REPORT ON BIODIVERSITY FOR FOOD AND AGRICULTURE FOR THE REPUBLIC OF SURINAME (RGB). Com-mission on Genetic Resources for Food and Agriculture. Paramaribo, 2015. 107p.
- RESENDE, M., CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F.; KER, J.C. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*, eds. Editora UFLA, 2014. 378p.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; DOS ANJOS, L.H.C.; DE OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T.J.F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355p.
- SANTOS, R.D; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C; SHIMIZU, S.H. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 83p.
- SLAGER, S.; SCHUYLENBORGH, J.V. Morphology and geochemistry of three clay soils in a tropical coastal plain (Surinam). *Agronomy Research Reports*, 734. 1970. 34p.
- TEUNISSEN, P.A. Vegetation and vegetation succession of the fresh watland. In: OUBOTER P.E (ed): *The Freshwater Ecosystems of Suriname*. Spring Science Business. 1993. p. 77-98
- TOPP, S.E.; SALBU, B.; ROALDSET, E.; JØRGENSEN, P. Vertical distribution of trace elements in laterite soil (Suriname). *Chemical Geology*, 47:159-174. 1984.
- VAN DER EYK, J.J. *Reconnaissance soil survey in Northern Surinam*. Thesis. Wageningen University and Research, 1957. 57p.
- VAN DER V.; PIETER K.J. *De bodemgesteldheid van het ritsenlandschap en van de oude kustvlakte in Suriname*. Thesis. G. Van Soest, 1957. 120p.
- VAN DER VOORDE, P.K.J. Podzolic soils in Suriname. *Podzolen in Suriname. De Surinaamse Landbouw (Suriname)*, 4: 45-51. 1965.
- WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES (WRB) 2014. international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.

CAPÍTULO 2 – CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS DE MINERAÇÃO DE OURO NO SURINAME USANDO TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGENS BASEADA EM OBJETOS E APRENDIZADO DE MÁQUINAS

RESUMO

Atividades de mineração artesanal de pequena escala e industrial de ouro causam grandes impactos ambientais, como desflorestamento e poluição das águas e ambientes por mercúrio e arsênio. O uso da classificação de imagens utilizando técnicas de análise de imagens baseada em objetos (OBIA) é pouco explorada e possui grande potencial de classificar e caracterizar áreas de mineração de ouro. Esse trabalho tem o objetivo de propor um método de classificação de imagens utilizando as técnicas de OBIA com AM para classificar e caracterizar áreas de mineração de ouro no Suriname. Imagens do Landsat 5 (2001 - 2008), Landsat 8 (2014), e do Sentinel-2/MSI (2020), foram utilizadas para análise temporal. Classes de uso e cobertura do solo (CUCS) foram definidas para avaliar as mudanças nos tipos de mineração por escavação mecânica e hidráulica. Foram definidas quatro classes de solo exposto (solo 1 (cava), solo 2 (rejeito), solo 3 (argiloso/laterítico) e estrada), cinco classes de água (limpa clara, limpa escura, com sedimentos (baixa, mediana e alta concentração)) e três classes de vegetação (estágio inicial, e avançado de regeneração e vegetação primária). Os índices NDVI, NDWI, NBSI, NDBI, BI e bandas Red e Blue foram as covariáveis que mais influenciaram no modelo de classificação das imagens multitemporais. O índice Kappa geral foi 0,90 para 2020 (Sentinel-2A), 0,85 para 2014 (Landsat-8) e 0,83 para 2008 e 2001 (Landsat-5). Entre 2001 e 2008 a área da mineração aumentou 100% (1.084 ha), iniciando nas partes médias da bacia com mineração hidráulica. No período de 2008 a 2014 a área de mineração aumentou 176% (3.812 ha), evoluindo para partes baixas e altas da bacia com início da escavação mecânica (11%). Entre 2014 e 2020 o aumento foi 27% (1.592 ha), sendo que 97% por escavação mecânica, com maior intensificação de cavas profundas na cabeceira da bacia, aumentando o potencial de contaminação da bacia principalmente por arsênio. Principais CUCS nos últimos anos entre 2014 e 2020 nas áreas de escavação mecânica foram: solo exposto (49,5%), vegetação em regeneração (41,3%) e águas (9,2%) e em áreas de mineração hidráulica foram a vegetação em regeneração (79,9%), água (11,4%) e solo exposto (8,7%). As áreas ativas de mineração nas áreas por escavação mecânica foi 54%, e hidráulica 13%. O método proposto utilizando técnicas de OBIA e AM possui grande potencial para classificar e caracterizar áreas de mineração de ouro, oferecendo melhor análise e monitoramento do impacto ambiental nas áreas

de mineração por escavação e hidráulica, o que permite melhor elaboração de políticas públicas para maior controle dessas áreas.

Palavras chaves: Poluição ambiental. Machine learning. Sensoriamento remoto. Classificação de imagem.

ABSTRACT

Small-scale artisanal and industrial gold mining activities has cause severe environmental impacts, as deforestation and water pollution by mercury and arsenic. The use of technique Object-Based Image Analalysis (OBIA) with Machine Learning (ML) is little explored and has great potential to classify and characterize gold mining areas. This work aims to propose a classification method using OBIA techniques with ML to classify and characterize gold mining areas in Suriname. Landsat 5 and 8 images from 2001, 2008 and 2014, and Sentinel-2A for 2020, were used for temporal analysis. Land Use and Land Cover (LULC) were defined to assess changes in mechanical and hydraulic excavation mining types. Four exposed soil classes were defined (soil 1 (pit), soil 2 (tailings), soil 3 (clayey/lateritic) and road), five water classes (clear, dark, with sediments (low, medium and high concentration)) and three vegetation classes (initial and advanced stage of regeneration and primary vegetation). The NDVI, NDWI, NBSI, NDBI, BI index and Red and Blue bands covariates were that most influenced the multitemporal image classification model. The overall Kappa index was 0.90 for 2020 (Sentinel-2A), 0.85 for 2014 (Landsat-8) and 0.83 for 2008 and 2001 (Landsat-5). Between 2001 and 2008 the mining area increased 100% (1,084 ha), starting in the middle parts of the basin with hydraulic mining. In the period from 2008 to 2014, the mining area increased by 176% (3,812 ha), expanding into the lower and upper parts of the basin with the start of mechanical excavation (11%). Between 2014 and 2020, the increase was 27% (1,592 ha), 97% of which due to mechanical excavation, with greater intensification of deep pits at upper of the basin, increasing the potential for contamination by arsenic. Main LULC between 2014 and 2020 in mechanical excavation were exposed soil (49.5%), regenerating vegetation (41.3%) and waters (9.2%) and in hydraulic areas were vegetation in regeneration (79.9%), water (11.4%) and exposed soil (8.7%). The mining in areas active by mechanical excavation was 54%, and hydraulic 13%. The proposed method using OBIA and AM techniques has great potential to classify and characterize gold mining areas, with great analysis, and monitoring the environmental impact, and elaboration of public policies for control of these areas.

Keywords: Machine learning. Remote sensing. Image classification. Small scale mining. Industrial mining.

1. INTRODUÇÃO

A mineração artesanal de pequena escala (MAPE) e industrial (MI) representam importantes atividades econômicas em alguns países, entretanto podem causar grandes impactos ambientais, pelo desmatamento, degradação do solo, poluição das águas principalmente pela contaminação com mercúrio e arsênio (Teixeira et al., 2020; Hilson e Maconachie, 2020; Corbett et al., 2017; Fritz et al., 2017). As MAPEs atuam na sua maioria de forma ilegal e ocorrem principalmente em países com pouca fiscalização ambiental (Ofosu et al., 2020), como é o caso do Suriname, que possui muitos recursos minerais e não tem legislação específica direcionada a esse setor (Seccatore e de Theije, 2017).

O Suriname está localizado dentro do escudo das Guianas e parte do país dentro do “Cinturão de rochas verdes” (*Greentone belt*), uma das grandes reservas de ouro do continente Sul-Americano, sendo intensamente minerado por MAPEs e MI (Kioe-A-Sen et al., 2016). No *Greentone belt* encontrasse depósitos de ouro primários como saprólitos, veios de quartzo e material laterítico, que normalmente são minerados através da mineração mecânica, e depósitos secundários, formados por materiais coluviais e aluviais muito intemperizados, sendo normalmente minerados pela mineração hidráulica (De Vletter e Hakstege, 1998; Dahlberg, 1984). Ambas as formas de exploração causam danos ambientais, entretanto a mineração mecânica que explora o ouro associado com os veios sulfetados, com pirita associada ao arsênio (*arsenopyrite*), pode gerar problemas ambientais com a contaminação do arsênio nos rios e lenções freáticos (Teixeira et al., 2020).

A mineração de ouro no Suriname é realizada desde a década de 1980 e nos últimos 20 anos, ocorreu de forma mais intensa (SBB, 2017; Rahm et al., 2014), ocasionando grandes impactos ambientais, como a contaminação dos corpos hídricos, solos e atmosfera pelo mercúrio (Ouboter, 2015), afetando diretamente à saúde dos mineradores e das comunidades próximas das margens dos rios e, indiretamente, às populações que vivem nos centros urbanos, as quais consomem peixes oriundos destes ambientes contaminados (Ottenbros et al., 2019; Ouboter, 2015).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta que possibilita detectar áreas de mineração localizadas em regiões remotas e de difícil acesso (Chen et al., 2018). Entretanto, aplicação desta ferramenta em áreas de MAPEs limita-se pela baixa resolução espacial e espectral de imagens com distribuição gratuita, e pela baixa acurácia das técnicas “convencionais” de classificação de imagens (Isidro et al., 2017; Chen et al., 2018; Gallwey et al., 2020).

A classificação supervisionada de imagens por pixel geralmente é a mais aplicada, principalmente para uso e cobertura do solo (Ouchra e Belangour, 2021; Blaschke, 2010). Entretanto, trabalhos realizados com a classificação por análise de imagem baseada em objetos, denominada OBIA (*Object-Based Image Analysis*) e ou geoespacial dos objetos (GEOBIA), tem demonstrado resultados de classificação com maior acurácia e desempenho que a classificação por pixel, principalmente em áreas de mineração de ouro (Souza-Filho et al., 2018; Jebur et al., 2014). Isso se deve ao fato de a OBIA agrupar pixels homogêneos com base nas informações espectrais e características como cor, textura, forma, área e escala e remove os ruídos pretos e brancos presentes na imagem denominado “*salt-and-pepper*” (Blaschke et al., 2014).

Técnicas que utilizam modelos de aprendizado de máquina (*machine learning*), aprendizado profundo (*deep learning*) e rede neural convolucional tem sido utilizadas com alta precisão para classificar imagens de satélites com uso e cobertura do solo (Kroupi et al., 2019) em áreas de mineração de ouro (Gallwey et al., 2020).

A combinação das técnicas de classificação de imagens utilizando OBIA com aprendizado de máquina em estudos recentes tem demonstrado ser eficaz e com elevada acurácia para classificar em imagens de satélites as áreas urbanas (Norman et al., 2021; Davari Majd et al., 2019), áreas de agricultura (Tang et al., 2020) e alagadas (Whyte et al., 2018). Outra consideração que normalmente áreas de mineração de ouro por estarem em ambientes amazônicos possuem grande quantidade de nuvens o ano todo, o que a combinação das técnicas poderiam contribuir para melhor análise. Apesar do potencial da técnica, até o momento pouco foi explorado em áreas de mineração de ouro. Essa técnica possibilitaria a elaboração de modelos de classificação com maior acurácia, e com isso aumentaria a capacidade de detecção e caracterização das áreas de mineração e sua expansão ao longo do tempo. Assim, o monitoramento e fiscalização dos impactos ambientais, pode ser realizado de uma forma mais efetiva, o que permitiria a elaboração e implementação de estratégias de conservação dos recursos em áreas intensamente degradadas. Nesse contexto, esse trabalho teve o objetivo de propor um método de classificação de imagem utilizando as técnicas baseada na análise de objetos (OBIA) com aprendizado de máquina para classificar e caracterizar áreas de mineração de ouro no Suriname.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo possui 700 km² e localiza-se no nordeste do Suriname, no distrito de Silpaliwini (Figura 1). Essa área encontra-se sobre o *Greenstone belt*, e possui as formações de Armina com metagreywacke, filitos, xistos e quartzitos, e a formação Rosebel com sedimentos arenosos (Gapais et al., 2021) (Figura 2a).

A área encontra-se dentro da segunda maior reserva de ouro do Suriname, a Merian, estimada em 119 toneladas (Kioe-A-Sen et al., 2016). Nessa área também se encontram os tipos de exploração de ouro no país, à escavação mecânica e hidráulica. Esta área de estudo pertencente a bacia hidrográfica do rio Maurouni, e possui papel importante na recarga do rio que abastece vários núcleos urbanos e serve como fonte de renda e alimentos para muitas comunidades ribeirinhas, as quais são afetadas diretamente pela contaminação gerada pela mineração nessas áreas (Ouboter, 2015; Ottenbros et al., 2019).

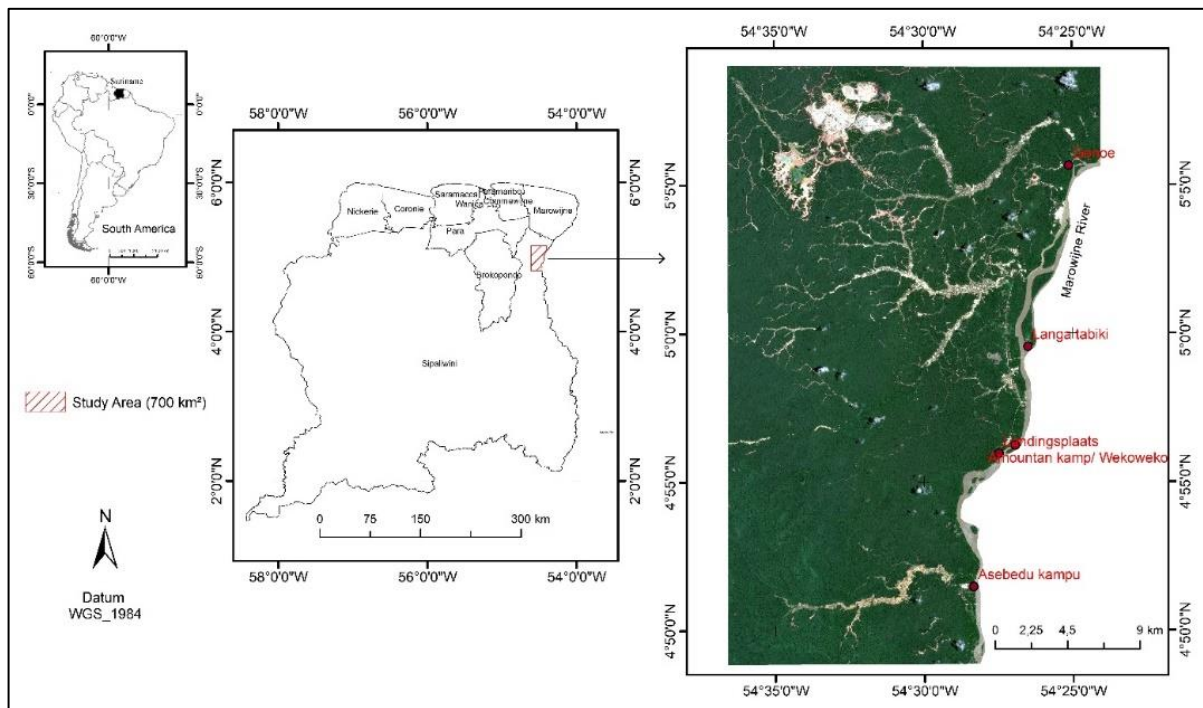


Figura 1. Localização da área de estudo, numa bacia hidrográfica do rio Marowijne no distrito de Silpaliwini, região nordeste do Suriname.

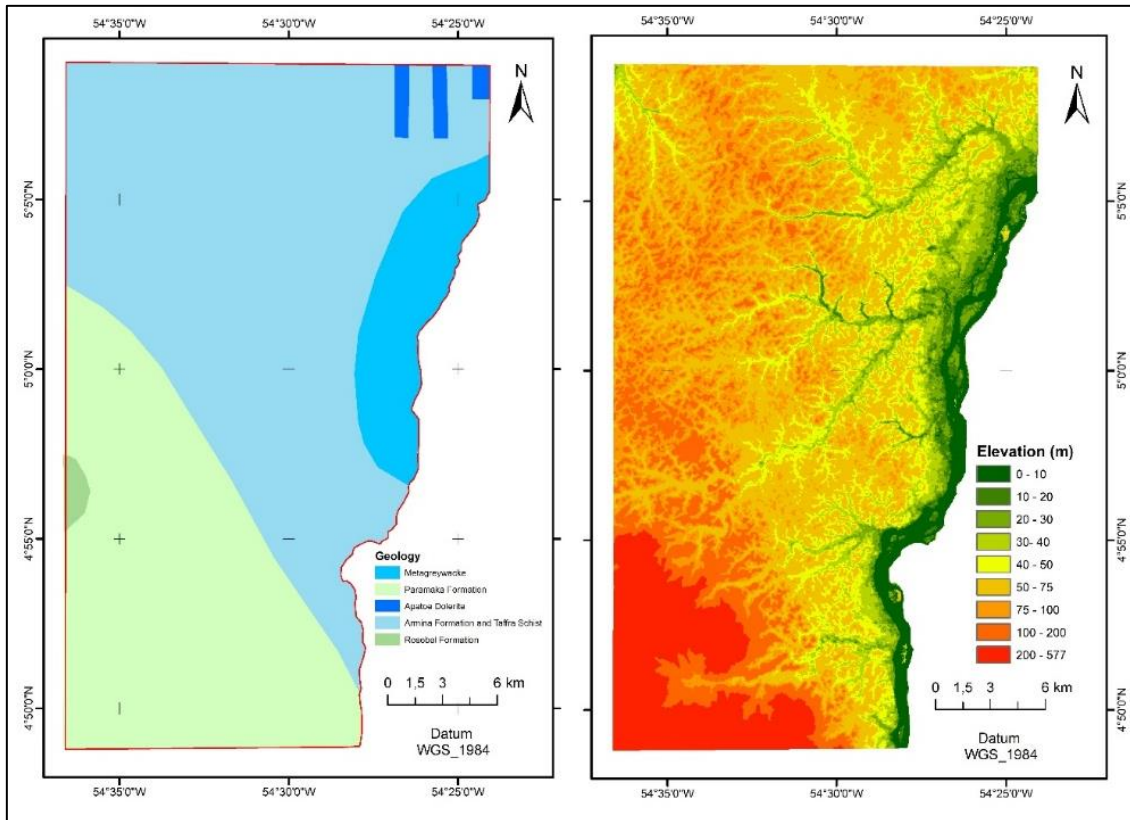


Figura 2. a) Mapa geológico (Kroonenberg et al., 2016), b) Modelo Digital de Elevação MDE de 30 m da bacia hidrográfica do rio Marowijine da área de estudo (NasaDEM, 2020).

2.2. Tipos de exploração e definição das classes uso e cobertura do solo (CUCS)

2.2.1. Tipos de exploração

A mineração de ouro no Suriname possui dois principais tipos de exploração de ouro (Seccatore e de Theije, 2017): 1) a **escavação mecânica** (cavas) realizada a céu aberto, utilizando escavadeiras, com os sedimentos transportados, triturados e separados posteriormente (Figura 3a, b). As cavas possuem formas mais arredondadas, as quais podem variar em profundidade de acordo com material explorado, sendo mais rasas em material laterítico e mais profundas em material saprolítico e veios de quartzo. 2) a **escavação hidráulica** explora o ouro aluvial e coluvial com aplicação de jatos de água de alta pressão sobre o solo, para separar as partículas finas de silte e argila do material mais grosseiro, rico em quartzo; este tipo de mineração tem formas mais retilíneas, que acompanham o leito dos rios, formando piscinas de sedimentos com diferentes concentrações, pilhas de rejeitos normalmente de um material mais grosseiro composto por grande quantidade de quartzo e com vegetação em diferentes estágios de regeneração (Figura 3c, d). O tamanho e impactos das áreas de mineração podem variar entre os tipos de mineração: a escavação mecânica tende a ser mais constante e

mais profundas, principalmente em áreas MI, enquanto a mineração hidráulica tende a ser mais superficiais e ocupar áreas mais extensas, sendo mais utilizada em áreas MAPE. Ambos os métodos de exploração geram grandes impactos ambientais.

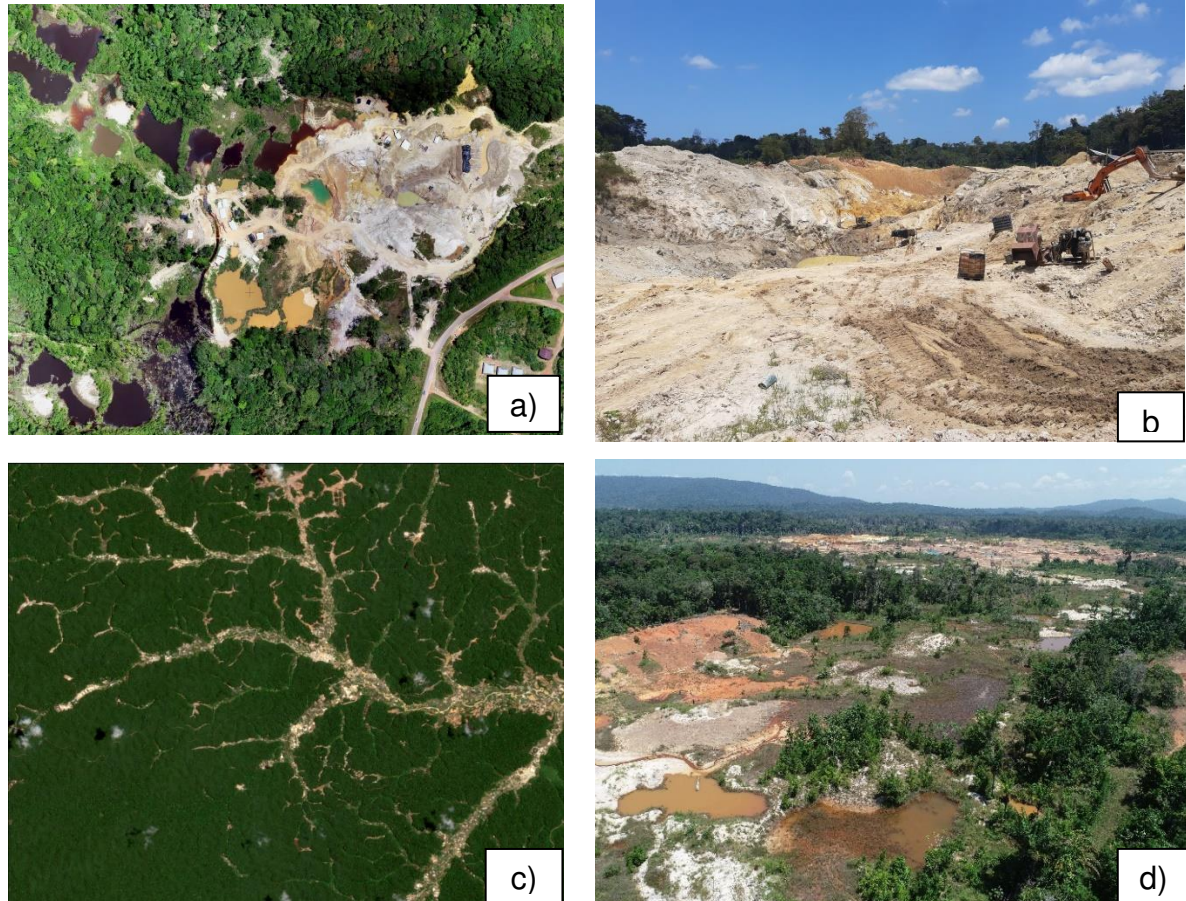


Figura 3. Áreas de ocorrência de mineração de ouro MAPE e MI na forma de escavação mecânica (a, b) e hidráulica (c, d), no Suriname.

2.2.2. Classes de uso e cobertura do solo (CUCS) e coleta de amostras

A amostragem das CUCS foi definida com base nas observações de campo e análises visuais das imagens de satélites e VANT. Foram definidos três principais grupos de ocorrência e 12 CUCS (Tabela 1). As amostras para treinamento da classificação foram coletadas de modo a representar o comportamento espectral para cada classe, pela interpretação visual das imagens com as delimitações dos polígonos correspondentes a segmentação da imagem realizada, utilizando o software ArcGis Pro 2.8.

Tabela 1. Descrições dos grupos e classes de uso e cobertura do solo (CUCS) da área de estudo

Grupo	CUCS	Descrição	Sigla
Solo exposto	Solo 1	Solo recém escavado em áreas de mineração por escavação. Normalmente escavado em saprólitos em maiores profundidades com coloração clara e textura mais arenosa em MI.	S1
	Solo 2	Formado por rejeitos, principalmente por quartzo.	S2
	Solo 3	Material normalmente laterítico. Solos com textura argilosa. Normalmente encontra-se nas camadas mais superficiais.	S3
	Estradas	Estradas sem pavimentação formadas pela compactação do solo, normalmente de textura argilosa.	EST
Água	Sedimentos Alta	Alta concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST). Normalmente encontra-se próximo as áreas de mineração hidráulica, com alta atividade.	ASA
	Sedimentos Moderada	Moderada concentração de SST. Normalmente, encontra-se em áreas de mineração hidráulica, com moderada atividade, em processo de sedimentação.	ASM
	Sedimentos Baixa	Baixa concentração de SST. Normalmente, encontra-se em áreas com pouca atividade de mineração, corpos hídricos e lagoas de sedimentação.	ASB
	Clara	Normalmente, possui coloração clara, com baixa concentração de SST e carbono orgânico totais (COT). Pode ser encontrada em lagoas de sedimentação e corpos hídricos.	ALC
	Limpa Escura	Possui coloração escura, com pouca concentração de SST e elevada decantação. Pode ser encontrada em lagoas de sedimentação em áreas de mineração hidráulicas abandonadas e inativas.	ALE
Vegetação	Regeneração 1	Vegetação em estágio inicial e médio de regeneração, com plantas em diferentes alturas e espaçamentos; e com maior ou menor quantidade de solo exposto a depender das áreas e do tipo de vegetação.	VR1
	Regeneração 2	Vegetação em estágio avançado de regeneração. Formação de vegetação secundária.	VR2
	Primária	Vegetação ombrófila densa em estágio primário.	VP

2.3. Conjunto de dados - database

2.3.1. Imagens de satélite

Imagens do satélite Sentinel-2/MSI foram adquiridas em setembro de 2020, através da *European Space Agency* - ESA <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. As imagens têm nível de processamento 2A, calibração radiométrica, correção atmosférica e cobertura de nuvens menor que 10%. As imagens do satélite Sentinel-2 possuem resolução espacial de 10 metros, 13 bandas, sendo a banda 8 na faixa de infravermelho próximo e bandas 11 e 12 no infravermelho de ondas curtas (SWIR), que possibilita maior detecção de áreas de mineração de ouro (Lobo et al., 2018). Imagens dos satélites Landsat 5 e 8 com 30 m de resolução foram utilizadas para avaliar a evolução temporal da área de estudo ao longo de 14 anos, em 2001, 2008 (Landsat-5) e 2014 (Landsat-8), com cobertura de nuvens menor que 10%. As imagens foram adquiridas no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS); site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, com nível 2 de processamento com correção atmosféricas e radiométricas. Imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) modelo Phantom 4 Pro foram obtidas em setembro/2019 em algumas áreas de mineração. Essas imagens foram complementadas com imagens do aplicativo Google Earth de alta resolução de 0,5 m (Maxar technologies) para avaliar com maiores detalhes as características dessas áreas e auxiliar na definição das classes e coletas de amostras de solos.

2.4. Processamento das imagens

2.4.1. Segmentação das imagens

A segmentação das imagens foi aplicada nas imagens multitemporais de 2001, 2008, 2014 e 2020, com as composições de banda B2, B3, B4 e B8 (Sentinel-2/MSI) e B1, B2, B3 e B4 (Landsat-5) e B2, B3, B4 e B5 (Landsat-8), utilizando o software ArcGis Pro 2.8. Os parâmetros utilizados na escala de segmentação foram: detalhe espectral, detalhe espacial e unidade mínima de mapeamento em pixel. Para definição dos valores dos parâmetros foram testadas diferentes configurações e determinou-se os melhores limites dos campos dos grupos homogêneos das classes determinadas. Os valores definidos para as imagens do Sentinel-2A foram 20 para detalhe espectral, 15 para o valor espacial e 5 para unidade mínima, que corresponde a uma área de 250 m². Os valores dos parâmetros utilizados nas imagens dos satélites Landsat 5 e 8 foram, 20 para detalhe espectral, 15 para espacial e 2 para unidade mínima de mapeamento, o que corresponde a 360 m².

2.5. Geração do banco de dados – Dataset

As 21 covariáveis espectrais foram obtidas com a imagem do Sentinel-2/MSI, sendo 11 índices espectrais e 10 bandas com 10 metros de resolução espacial (Blue, Green, Red, Edge 1, Red Edge 2, Red Edge 3, Red Edge 4, Near Infra-Red (NIR), SWIR-1 and SWIR-2). Às 17 covariáveis foram obtidas com cada imagem de Landsat 5-8, sendo 11 índices espectrais e 6 bandas espectrais com 30 metros (Blue, Green, Red, Near Infra-Red (NIR), SWIR-1 and SWIR-2). No Software ArcGis Map 10.8, 11 índices espectrais foram calculados de acordo com as respectivas equações abaixo: NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (Eq. (1)), NDWI - *Índice de Água por Diferença Normalizada* (Eq. (2)), NDTI - *Índice de turbidez por diferença normalizado* (Eq. (3)), BI - *Bare Soil Index* (Eq. (4)), BBI - *Índice de brilho da superfície do solo* (Eq. (5)), Clay (Eq. (6)), DBSI - *Índice de solo seco* (Eq. (7)), OI - *Óxido de ferro* (Eq. (8)), MBSI - *Índice de brilho da superfície de brilho modificado* (Eq. (9)), NDBI - *Índice de Brilho por Diferença Normalizada* (Eq. (10)), SI - *Saturação index* (Eq. (11)).

i NDVI - *Normalized difference vegetation index*, Eq (1), por McFeeters (1996):

$$NDVI = (Red - NIR) / (Red + NIR) \quad (1)$$

ii NDWI - *Índice de Água por Diferença Normalizada*, Eq. (2), por McFeeters (1996) :

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (2)$$

iii NDTI - *Índice de turbidez por diferença normalizado*, Eq. (3), por Lacaux et al. (2007) :

$$NDTI = (SWIR1 - NIR) / (SWIR1 + NIR) \quad (3)$$

iv BI - *Bare Soil Index*, Eq. (4), por Wanhui Chen et al. (2004):

$$BI = [(SWIR + Red) - (NIR + Blue)] / [(SWIR + Red) + (NIR + Blue)] \quad (4)$$

v BBI - *Índice de brilho da superfície do solo*, Eq. (5), por Wanhui Chen et al. (2004):

$$BBI = \sqrt{((Red * Red) / (Green * Green)) / 2} \quad (5)$$

vi Clay, Eq. (6), por Bousbih et al. (2019) :

$$Clay = (SWIR1 / SWIR2) \quad (6)$$

vii DBSI - *Índice de solo seco*, Eq. (7), por Rasul et al. (2018):

$$DBSI = ((SWIR1 - G) / (SWIR + G)) - NDVI \quad (7)$$

viii OI - *Óxido de ferro*, Eq. (8), por Hewson et al., (2001):

$$IO = (Red/Blue) \quad (8)$$

ix MBSI - *Índice de brilho da superfície de brilho modificado*, Eq. (9), por Nguyen et al. (2021):

$$MBSI = (SWIR1 - SWIR2 - NIR) / (SWIR1 + SWIR2 + NIR) + 0.5 \quad (9)$$

x NDBI - *Índice de Brilho por Diferença Normalizada* Eq. (10), por Deng et al. (2015):

$$NDBI = (SWIR1 - NIR) / (SWIR1 + NIR) \quad (10)$$

xi SI - *Saturação index*, Eq. (11), por Li and Liu (2008):

$$SI = (Red - Blue) / (Red + Blue) \quad (11)$$

2.6. Método de classificação usando técnicas de OBIA e ML

2.6.1. Extração de valores e cálculo de parâmetros estatísticos

Em cada segmento onde foi coletado as amostras de treinamento foram extraídos os valores das covariáveis, e em seguida calculados os parâmetros estatísticos (valor mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão, percentis (q) 05, 25, 75, 95, intervalo interquartil e coeficiente de variação), e os parâmetros de forma dos objetos (área, perímetro, fator de forma, área circular e ângulo) utilizando o software R (Team, 2019). Ao final desta etapa o banco de dados continha, 162 variáveis (colunas) e 195 amostras (linhas) para imagem Landsat-5 (2001), 162 variáveis (colunas) e 190 amostras (linhas) para imagem Landsat-5 (2008), 162 variáveis (colunas) e 205 amostras (linhas) para imagem Landsat-8 (2014) e 268 variáveis (colunas) e 573 amostras (linhas) para imagem Sentinel-2(2020). O cálculo dos parâmetros foi utilizado na descrição estatística dos padrões das áreas de mineração, além da base de entrada para a classificação OBIA com ML.

2.6.2. Seleção e eliminação de covariáveis

Valores espúrios e nulos foram eliminados utilizando a técnica *Recursive Feature Elimination* (RFE) com a função *nearzerovar* (NZV) contido no pacote *Caret* (Kuhn, 2019), pois a presença desses valores não contribuiu para a classificação. Em seguida, as covariáveis passaram pelo processo de remoção por correlação, com a identificação das variáveis com alta correlação e remoção das mesmas. Foi aplicado o cálculo da correlação de Spearman, sendo avaliados as duplas que obtiveram correlação superior ou igual a 97%. Em seguida as duplas acima desse valor foram avaliadas com relação a correlação com outras covariáveis são

calculadas as médias dos valores de absolutos de correlação de uma variável do par com todas as demais variáveis. O mesmo é feito para a segunda variável. A que tiver a maior média é removida pela função *find correlation* do pacote *Caret* (Kuhn, 2019). Nesta fase foram eliminadas cerca de 50% das variáveis, sendo 129 covariáveis das 268 Sentinel-2/MSI, 86 covariáveis das 162 Landsat-8 (2014), 84 covariáveis das 162 Landsat-5 (2008) e 83 covariáveis das 162 Landsat-5 (2001).

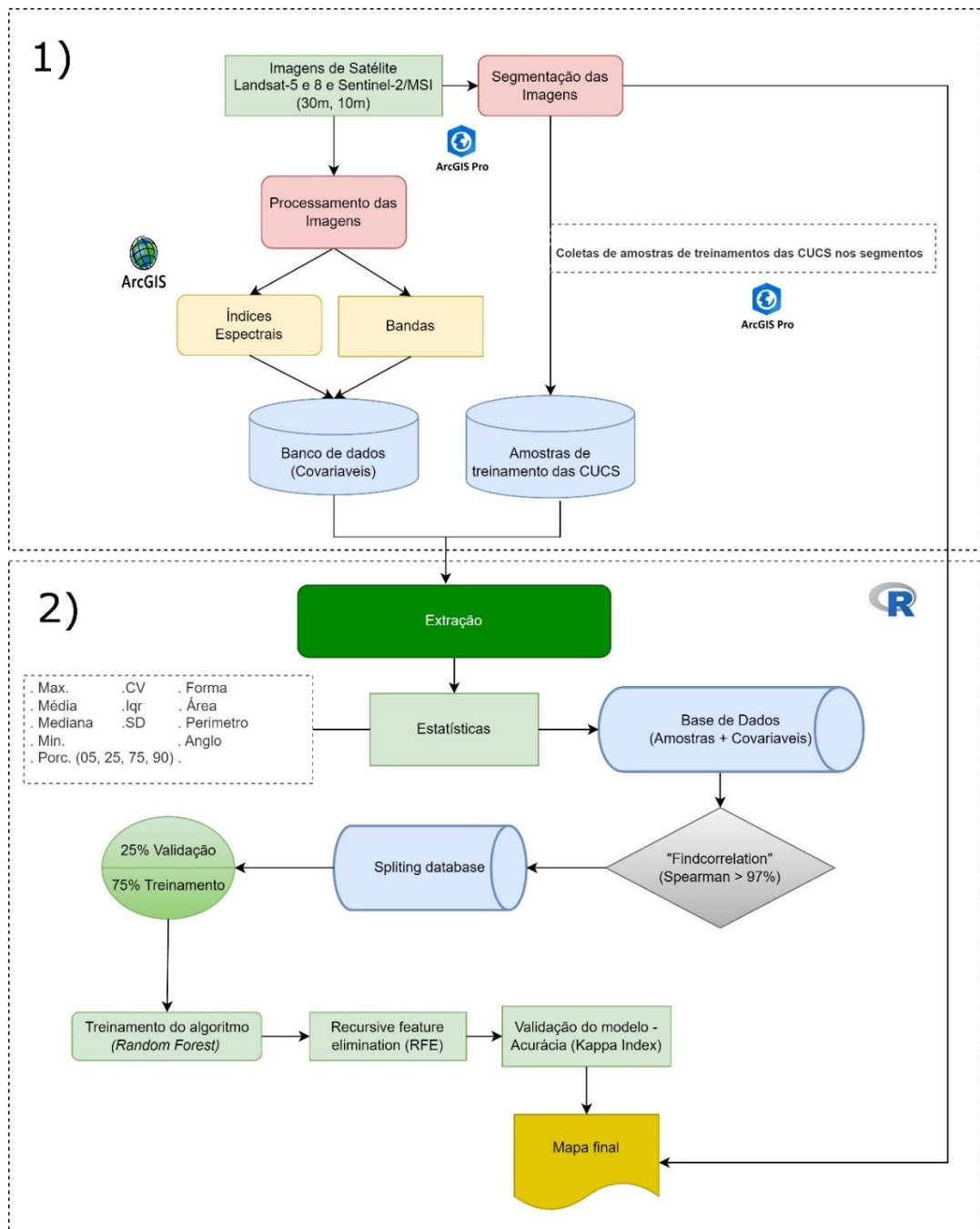


Figura 4. Fluxograma com as etapas do processamento do modelo proposto utilizando. 1) processamento das imagens - GIS software, 2) Classificação das imagens - R software (aprendizado de máquina).

2.6.3. Treinamento e predição

O banco de dados das amostras foi dividido em 75/25, ou seja, 75% para treinamento do modelo e 25% para sua validação. O algoritmo de classificação adotado foi o *Random Forest* elaborado por Breiman (2001), utilizando pacote R (Liaw e Wiener, 2002). O passo seguinte foi selecionar as variáveis que melhor classificaram e apresentaram maior correlação com as classes amostradas para separação dos tipos de mineração com a função do RFE. Após a seleção das variáveis foi realizado o treinamento utilizando o algoritmo *Random Forest*. Nessa etapa o ajuste do modelo foi executado cem vezes. O resultado foi 100 modelos.

2.6.4. Avaliação da acurácia

A acurácia do modelo da classificação para as CUCS foi realizada pelo método de matriz confusão do índice Kappa (Eq. (12)), que é calculado pela matriz de confusão, medindo a concordância entre a classificação e a referência adotada pelas amostras de treinamentos (Congalton, 1991). O coeficiente Kappa fornece um valor numérico que representa o grau de concordância entre a detecção (classificação) e a verdade referencial básica (Morales et al., 2018). De acordo com o valor do índice kappa (k), a detecção varia de ruim ($k < 0$) a quase perfeita ($0,8 < k \leq 1,0$) (Landis e Koch, 1977).

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^c n_{ii} - n \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}} \quad (12)$$

2.6.5. Mapa e resultados

O mapa final foi produzido com o cálculo da moda das 100 rodadas com as classes de CUCS mais frequentes para cada segmento em cada imagem nos anos de 2001, 2008, 2014 e 2020. Os resultados dos mapas finais foram avaliados por sua consistência com a distribuição espacial das CUCS na área de estudo.

2.7. Pós-processamento das imagens

Após a classificação das imagens, as áreas foram reclassificadas em áreas de mineração por escavação mecânica e hidráulica com base no resultado da classificação, características e formas para todas as imagens multitemporais utilizando o software ArcGIS 10.8. Para mineração por escavação mecânica considerou a forma normalmente mais arredondadas, e com maior presença de solo exposto, principalmente solo 1 (saprólito) em cavas mais profundas em MI de grande escala, e solo 3 (argiloso e laterítico) em cavas menos profundas com mineração

em menor escala. A mineração hidráulica foi separada com base nas formas mais retilíneas que seguem o percurso dos rios, com vegetação em regeneração estágio 1 e 2, solo exposto 2 (rejeitos), e lagoas e cursos hídricos com diferentes concentrações de sedimentos e com água limpa escura. Após a separação do tipo de mineração foram quantificadas as CUCS dentro de cada área.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Covariáveis selecionadas pelo método

O algoritmo selecionou o menor número de covariáveis com a maior predição no modelo de classificação para cada imagem de satélite. Foram selecionadas 14 covariáveis para a imagem do Sentinel-2 (2020), sendo as 6 primeiras variáveis mais importantes com a melhor acurácia do modelo: NDVI_q25, NDWI_25, Red_q25, Blue_max, NBSI_q75, NDBI_q95. 20 covariáveis foram selecionadas na imagem Landsat 8 (2014), sendo as 7 (sete) primeiras com maior influência no modelo: NDVI_q75, NDWI_q25, Red_min, DBSI_min, BI_q25, Blue_max, NDBI_q95. 17 covariáveis foram selecionadas para as imagens de Landsat-5 (2008), sendo as 6 (seis) primeiras com maior influência no modelo: NDVI_q25, NDWI_q75, Red_q25, BI_75, DBSI_q25, NDBI_95. Para as imagens de Landsat-5 (2001), 16 covariáveis foram selecionadas para as imagens de Landsat-5 (2008), sendo as 5 (seis) primeiras com maior influência no modelo: NDVI_q25, Red_q25, DBSI_25, BI_25, DBI_q75. Para todas as imagens nenhuma das covariáveis de forma foram selecionadas.

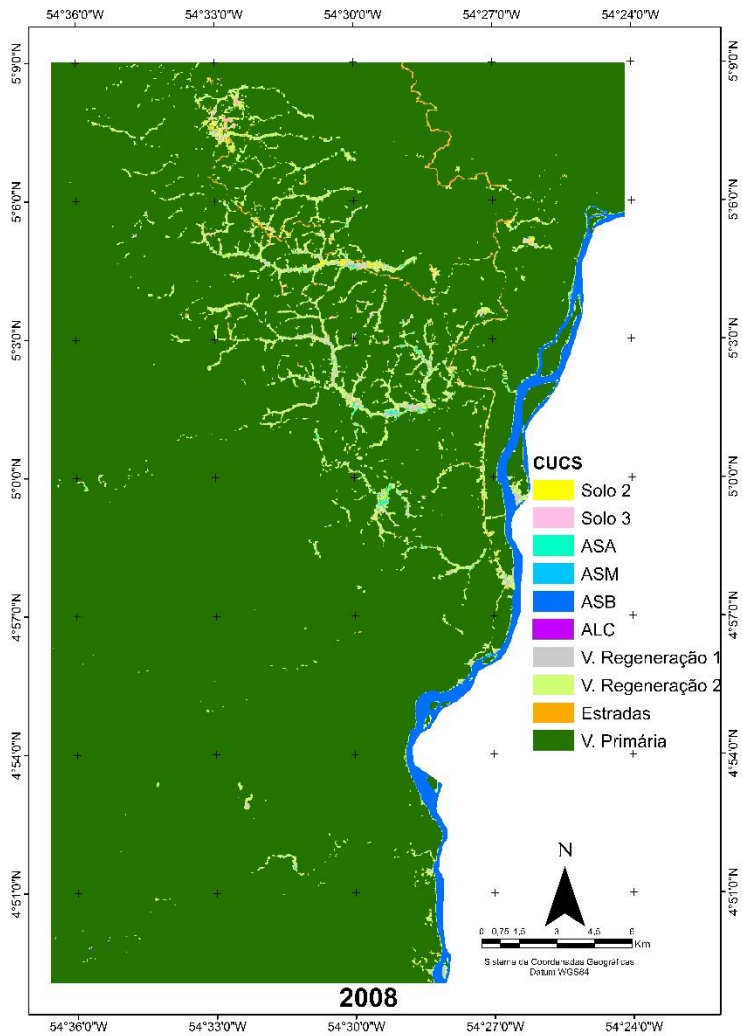
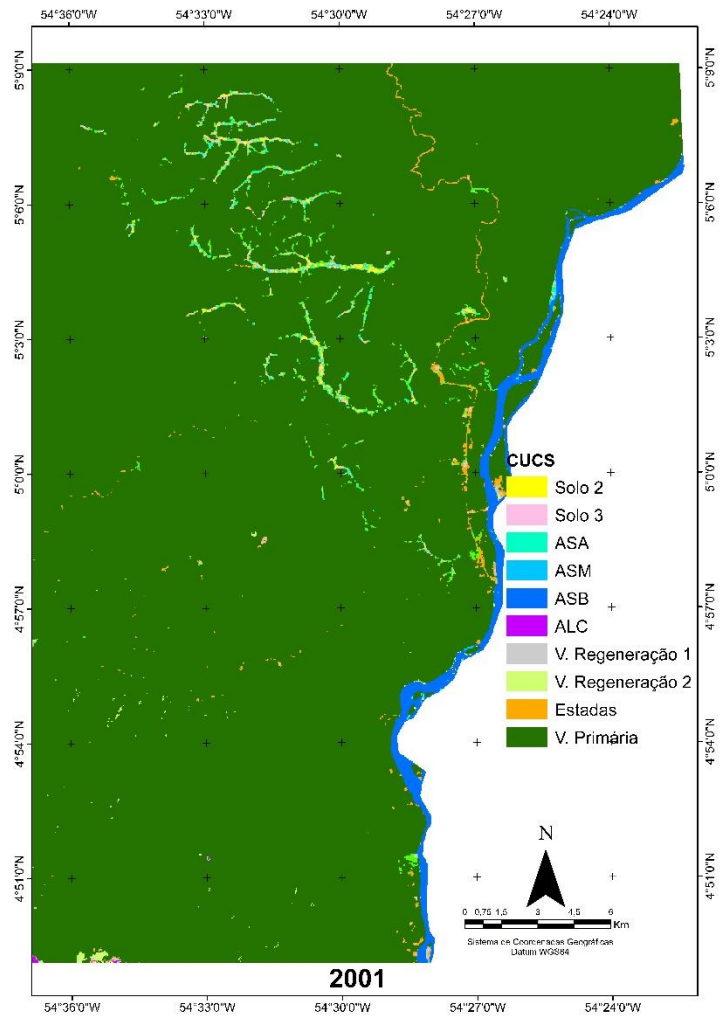
Tabela 2. Variáveis mais importantes na classificação das imagens de Landsat-5 (2001 e 2008), Landsat-8 (2008) e Sentinel-2 (2020)

Ordem de importância	2020	2014	2008	2001
1^a	NDVI_q25	NDVI_q75	NDVI_q25	NDVI_q25
2^a	NDWI_25	NDWI_q25	NDWI_q75	Red_q25
3^a	Red_q25	Red_min	Red_q25	DBSI_25
4^a	Blue_max	DBSI_min	BI_75	BI_25
5^a	NBSI_q75	BI_q25	DBSI_q25	DBI_q75
6^a	NDBI_q95	Blue_max	NDBI_95	
7^a		NDBI_q95		

O índice de vegetação NDVI com diferentes parâmetros estatísticos foi o que mais influenciou na classificação das imagens multitemporais, e esse resultado se deve a capacidade do índice em separar vegetação em diferentes estágios e solos expostos em áreas de mineração, por maior sensibilidade da banda do infravermelho próximo, que fornece informações sobre a vegetação (Souza-Filho et al. 2018; Isidro et al., 2017). O índice NDWI que também foi importante na classificação permite identificar corpos de água com diferentes concentrações de sedimentos suspensos, que se deve ao comprimento de onda do verde e infravermelho próximo (NIR) (McFeeters, 1996; Özelkan, 2020). No entanto a banda do vermelho possibilita separar e quantificar diferentes concentrações de sedimentos em águas (Lobo et al., 2012), sendo uma variável importante para discriminação de classes de qualidade de água em áreas de mineração de ouro (Lobo et al., 2015). Os índices DBSI, NDBI, BI foram os que mais influenciaram na separação das classes de solos exposto, que se deve principalmente que solos possuem alta taxa de refletância na banda do SWIR, o que permite separar diferentes classes, principalmente pela presença do quartzo (Demattê et al., 2019), que é comumente encontrado em áreas de mineração do tipo escavação hidráulica. Segundo Rasul et al. (2018) e Liu et al. (2022) as bandas do SWIR também permite gerar índices de umidade do solo que contribui para separar essas classes. Normalmente solos de áreas de mineração hidráulica e escavação tendem a ter diferentes umidades, em que áreas de escavação hidráulica possuem maior umidade e solos com maior teor de quartzo e em áreas de escavação os solos tendem a ser mais secos e com maior teor de argila. A não seleção das covariáveis de forma pode estar relacionada com a alta variabilidade entre as formas das CUCS, e, ou seja, não possuem padrões de formas bem definidas, quando se usa imagens de satélites de média e baixa resolução. Esse resultado demonstra que além das bandas espectrais outros índices com diferentes estatísticas devem ser considerados para aumentar a acurácia dos modelos para classificação de áreas de mineração.

3.2. Classificação e avaliação do desempenho dos mapas multitemporais

A classificação com OBIA e com aprendizado de máquina classificou as imagens multitemporais de Sentinel-2/MSI de 2020 com índice Kappa geral de 0,90 (Figura 6d), com acurácia por classes maior que 90%, com exceção as classes de solo exposto, menor que 88%. A imagem de 2014 (Landsat-8), obteve índices Kappa 0,85, com acurácia por classe maior que 80%, exceto as classes solo exposto, menor que 70% (Figura 6c). As imagens de 2001 e 2008 (Landsat-5) foram classificadas com índice Kappa de 0,83, com acurácia por classe maior que 80%, com exceção das classes de água e solo exposto, menor que 80% (Figura 6a, b).



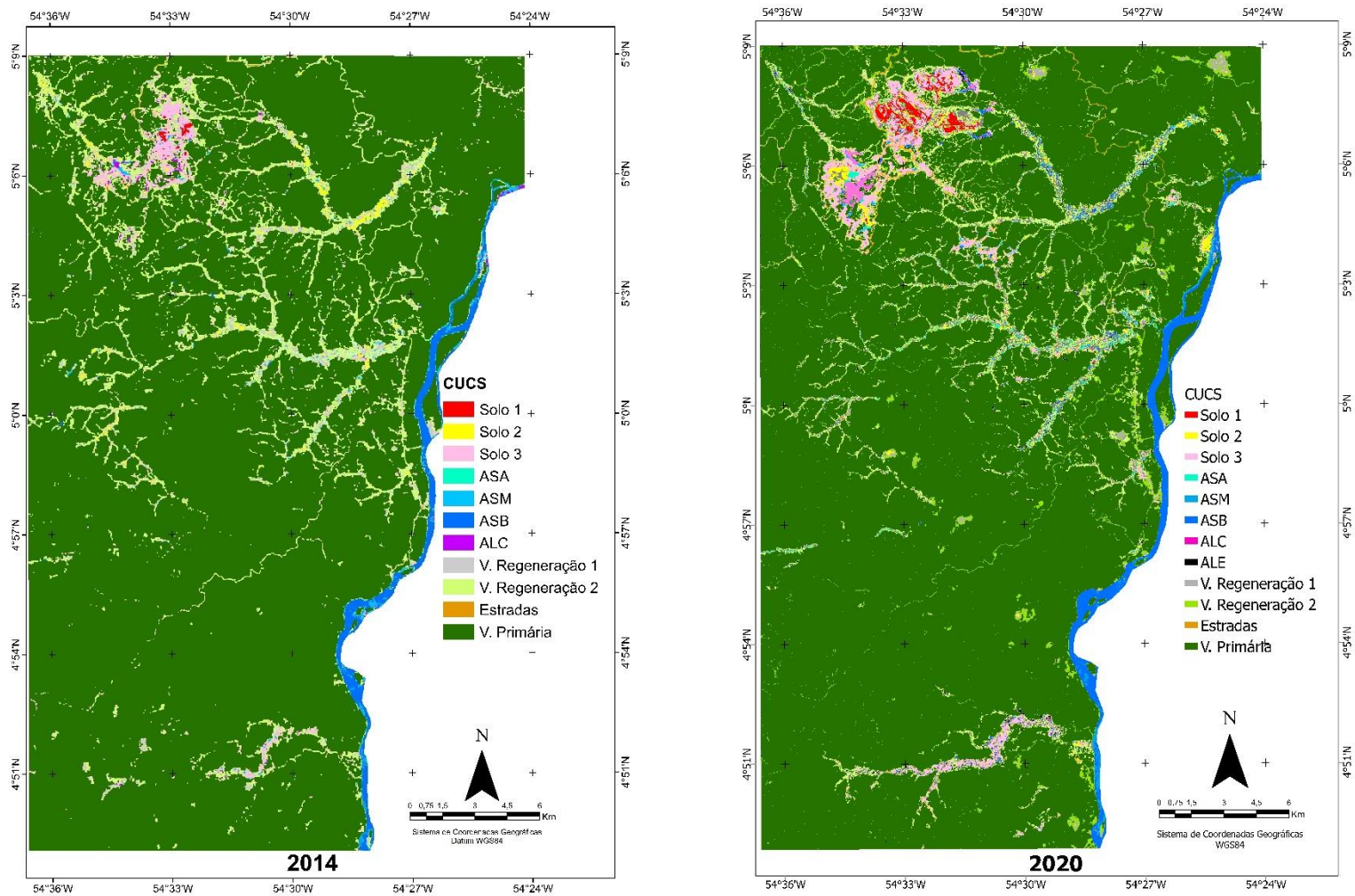


Figura 6. Mapa de classificação das imagens Landsat 5-8 e Sentinel-2/MSI, com variação temporal e espacial das CUCS para os anos de 2001, 2008, 2014 e 2020.

O Melhor índice Kappa e acurácia das CUCS da imagem Sentinel-2/MSI em comparação as do Landsat-5,8 se deve maior resolução espacial da imagem de 10 metros, que permite melhor segmentação com maior detalhamento dos objetos nas imagens, aumentando o índice de acerto da classificação (Labib e Harris, 2018; Nyamekye et al., 2021). Ao se considerar a classificação da imagem do Sentinel-2/MSI, semelhantes resultados foram encontrados por Isidro et al. (2017) e Souza-Filho et al. (2018) utilizando a classificação GEOBIA em áreas de mineração de ouro na região tropical das Filipinas e Amazônia brasileira que obtiveram Kappa de 0,88 e 0,85, respectivamente. Os valores de Kappa são maiores quando comparados com trabalhos com a classificação pixel-pixel, na região amazônica do Peru, de 0,72 (Espejo et al., 2018), e no Brasil, de 0,70 (Lobo et al., 2018). Quando se utilizou a classificação por redes neurais em Gana, a acurácia geral foi maior, 0,92 com a classificação pixel-pixel (Gallwey et al., 2020). Neste trabalho tem-se um avanço na subdivisão das classes nas áreas de mineração de ouro, pois grande parte dos trabalhos realizados consideraram as áreas de mineração apenas como uma única classe e não subdividindo em subclasses o que possivelmente diminuiria o índice de acerto e acurácia, devido à alta variabilidade espectral das diferentes classes na área e pela baixa resolução espacial das imagens (Espejo et al., 2018; Isidro et al., 2017). A separação das áreas de mineração em subclasses possibilita melhor caracterização e avaliação do impacto ambiental principalmente por identificar áreas que estão com maiores atividades.

3.3. Caracterização das áreas de mineração

3.3.1. Análise multitemporal das mudanças e evolução das áreas de mineração

As imagens demonstram avanço da mineração temporal com a primeira fase de exploração coluvial e aluvionar e a segunda fase de exploração mecânica por escavação atingindo a cabeceira da bacia hidrográfica. O ciclo de exploração de ouro nas áreas está relacionado com a tecnologia e forma de material encontrado. Em 2001 se inicia a exploração ouro aluvial nos trechos médios e alto dos rios, com drenagens menores e isoladas com a mineração hidráulica, onde acesso ao ouro aluvionar era mais fácil, totalizando 1.084 ha (Figura 7 e 8a). No período de 2001 a 2008 aumentou o alcance exploratório, com exploração das partes mais baixas até a cabeceira da bacia, duplicando área de mineração para 2.164 ha e início da exploração mecânica (11%). Entre 2008 e 2014, iniciou-se a exploração mais intensa por escavação mecânica da cabeceira da bacia, principalmente em material laterítico, aumentando área em 137% (2.971 ha), somando 5.135 ha. Entre 2014 e 2020 o aumento das áreas foi de

47% (2.433 ha), sendo que cerca de 97%, foi por escavação mecânica explorando principalmente o ouro laterítico, saprólito e veios de quartzo na cabeceira da bacia, intensificando o problema ambiental e totalizando área de 7.374 ha. Quanto a evolução das áreas pelos métodos de exploração temos que a mineração hidráulica em 2001 era 100% e em 2008 representava 89% (Figura 7 e 8b). Em 2014, 74% das áreas era por mineração hidráulica e 26% escavação mecânica. Em 2020, 51% das áreas era por mineração hidráulica e 49% por escavação mecânica. A área de mineração por escavação mecânica teve aumento expressivo entre 2008 e 2014 de 450%, e de 179% entre de 2014 a 2020.

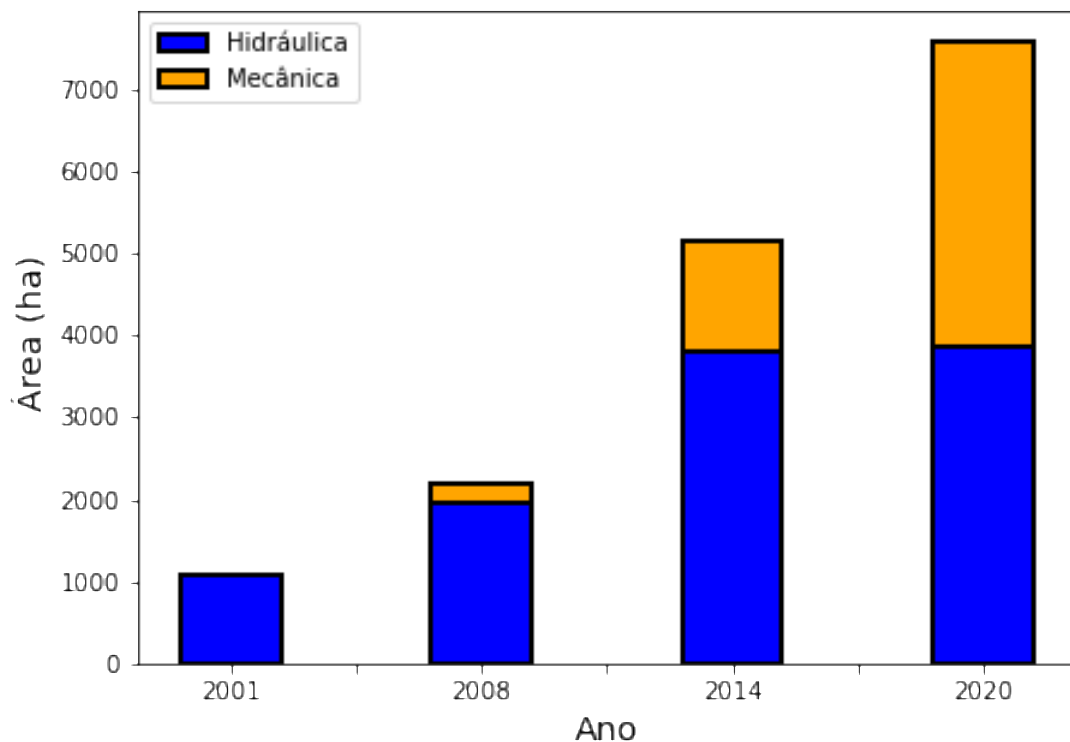


Figura 7. Evolução das áreas da mineração pelos métodos de exploração mecânica e hidráulica entre 2001 e 2020.

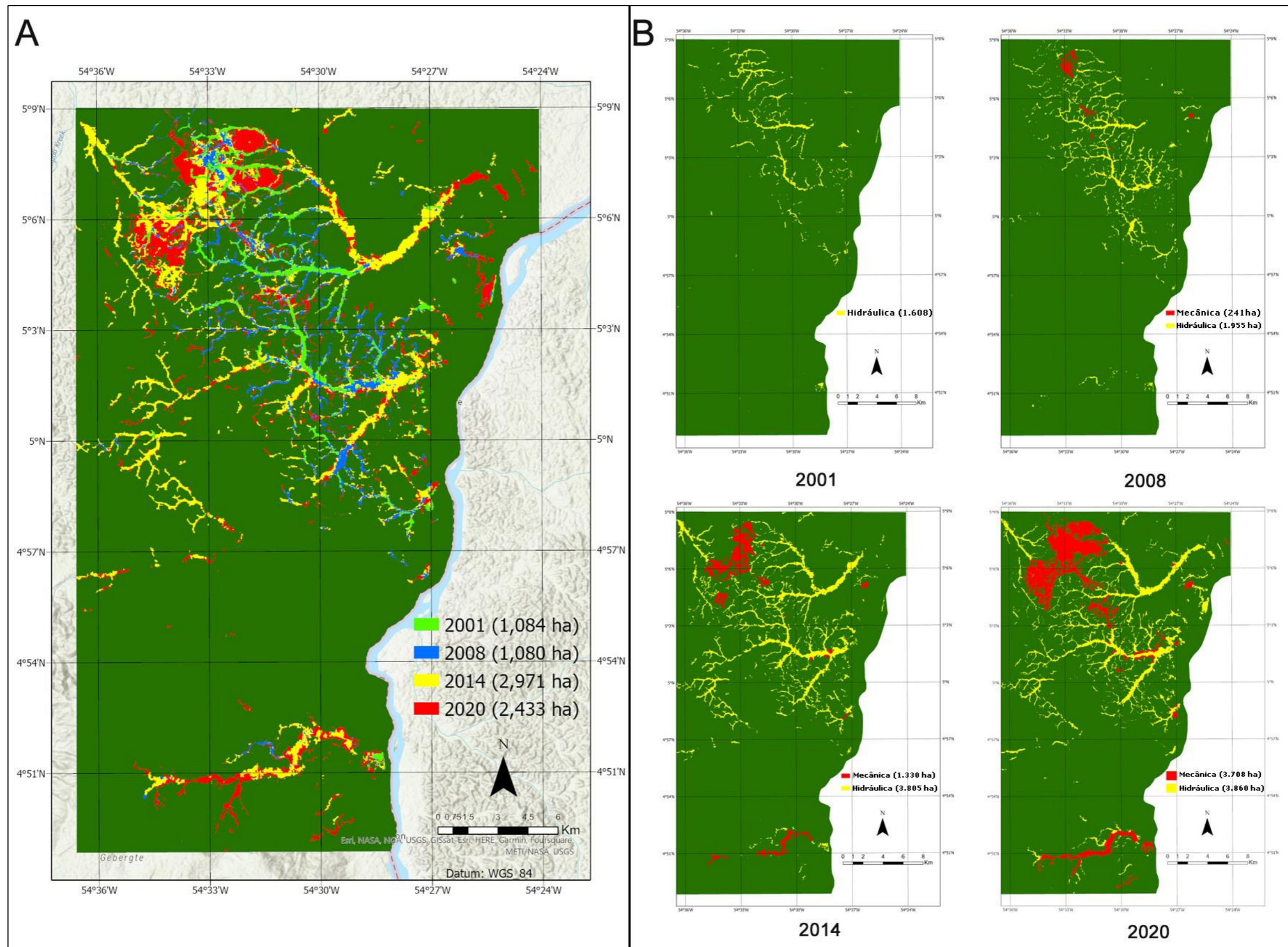


Figura 8. Dinâmica espaço-temporal da área de mineração total (a) e por mineração por escavação mecânica e hidráulica (b), entre 2001 a 2020.

Maior aumento das áreas de mineração de ouro principalmente entre 2008 e 2014 no Suriname, e outras regiões como da Amazônia brasileira (Souza-Filho et al., 2018) e peruana (Espejo et al., 2018), regiões de Ghana na África (Obodai et al., 2019) e outros países do mundo, se deve ao aumento preço do ouro pela maior demanda no mercado internacional (Rahm et al., 2014; Fritz et al., 2017) (Figura 9). Já a redução da expansão das áreas a partir de 2014 em alguns países, principalmente na América Latina, se deve a flutuação cambiais e preços e a incerteza geológica (Verbrugge e Geenen, 2019). Com relação ao aumento expressivo das áreas por escavação mecânica no Suriname nos últimos anos, podem estar relacionados com a redução das reservas do ouro aluvial, uma vez que a exploração hidráulica possui menor custo comparado com a escavação (Seccatore e de Theije, 2017). A fase atual de exploração da cabeceira da bacia hidrográfica do rio Marowijine, principalmente por cavas profundas em saprólitos, pode estar comprometendo toda bacia hidrográfica, gerando drenagem ácida com a oxidação do arsenopirita e gerando arsênio, que causa graves problemas ambientais, que por ser bioacumulável, e caso atinja níveis tóxicos, pode causar graves problemas a saúde humana, desde mutações, câncer e desenvolvimento de anomalia em fetos (Sun et al., 2018).

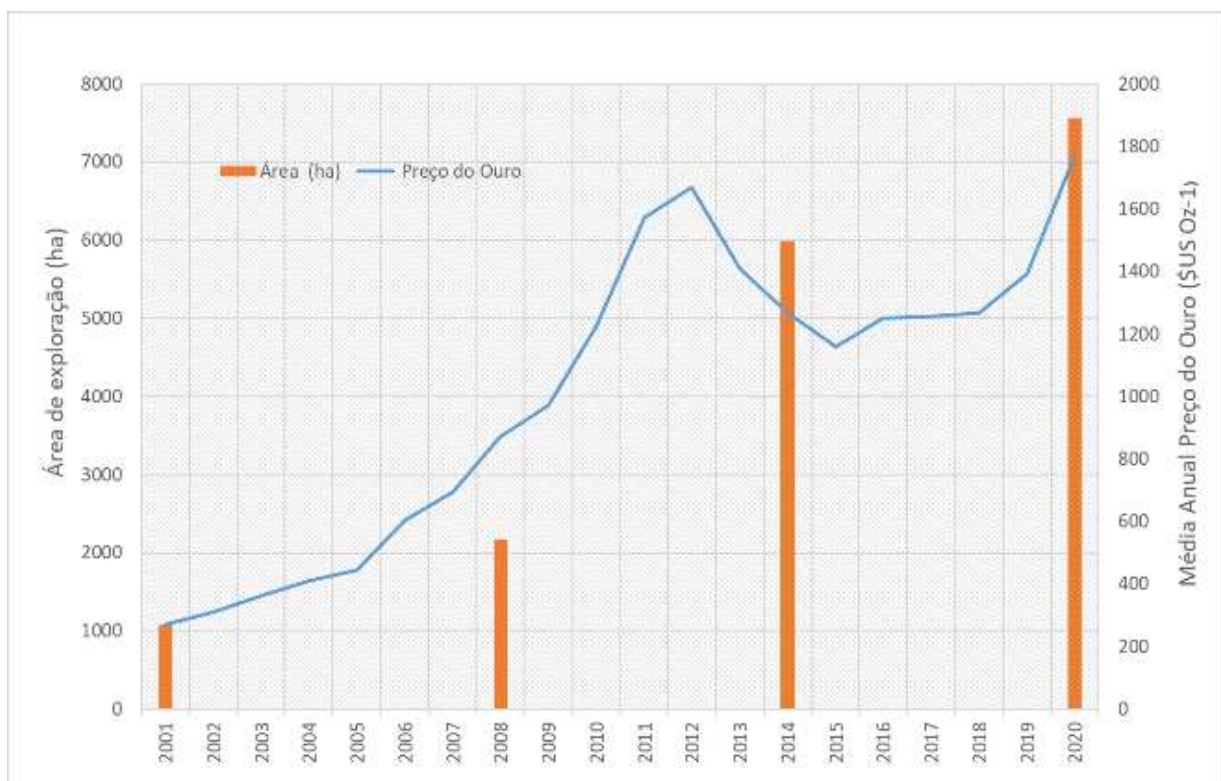


Figura 9. Evolução das áreas de mineração (ha) nas áreas de estudo com o preço do ouro no mercado internacional entre 2001 e 2020. Fonte: goldprice.org.

3.3.2. Distribuição das CUCS nos tipos de mineração escavação mecânica e hidráulica

Considerando a distribuição das CUCS nos tipos de mineração por escavação mecânica e hidráulica principalmente nos últimos anos entre 2014 e 2020 temos que: em áreas por escavação mecânica as classes de solo exposto possuem maior área com 49,5% (1.836 ha), sendo o solo 3, com maior porcentagem (67%), seguida pelo solo 1 (13%) e solo 2 (11%) e estrada (9%) (Figura 10a). A vegetação em regeneração possui 41,3% (1.531), sendo a regeneração 2 com 69% das áreas. As classes de água possuem 9,2% (341 ha), sendo a classe água limpa clara presente em maior quantidade (55%). Nas áreas de hidráulica a classe de vegetação em regeneração foi de maior ocorrência com 81% (3.126 ha), sendo que 73% por vegetação em regeneração 2 (Figura 10b). As classes de água possuem 12,4% (478 ha), divididos em classes com sedimento com concentração baixa (34%), moderada (29%) e alta (22%), classes água limpa clara (14%) e água limpa escura (< 1%). O solo exposto possui 6,5% (200 ha), com a classe 2 em maior quantidade (70,7%), seguida pela classe 3 (28,5%). Ao considerar as atividades da mineração na área de estudo, observa-se que a mineração por escavação está presente 54% de áreas ativas e 46% inativas, em processo de recuperação ou regeneração e nas áreas de mineração hidráulica possuem 13% com algum tipo atividade, e 87% das áreas encontrasse inativas e ou abandonadas, em processo de regeneração da vegetação.

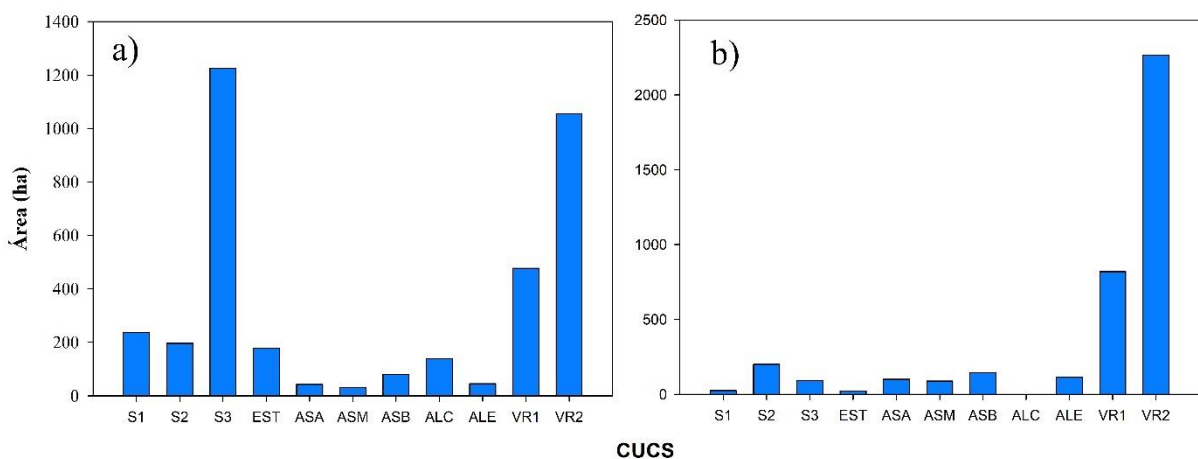


Figura 10. Distribuição das CUCS em áreas de mineração do tipo escavação mecânica (a), e hidráulica (b) entre 2014 e 2020. S1 – Solo 1; S2 – Solo 2; S3 – Solo 3; EST – Estrada; ASA – Água Sedimentos Alta; ASM – Água Sedimentos Moderada; ASB – Água Sedimentos Baixa; ALC – Água Limpa Clara; ALE – Água Limpa Escura; VR1 – Vegetação Regeneração 1; VR2 – Vegetação Regeneração 2.

Distintas técnicas de exploração de ouro causam diferentes CUCS, que inclui solos expostos, corpos hídricos, vegetações degradadas e em recuperação e outros (Lobo et al., 2017; Chen et al., 2018), e entender essa dinâmica e evolução dessas áreas é muito importante para compreender e avaliar melhor os impactos ambientais (Chen et al., 2018), uma vez que a recuperação das florestas após a mineração no Suriname é lenta e qualitativamente inferior as primárias (Peterson e Heemskerk, 2001).

4. CONCLUSÕES

O método proposto nesse estudo utilizando técnicas de classificação OBIA com técnicas de aprendizado de máquina possui grande potencial para classificar e caracterizar com precisão áreas de mineração de ouro com os métodos de exploração mecânico ou hidráulico, oferecendo dados acessíveis para melhor análise e monitoramento do impacto ambiental nas áreas de mineração de ouro, sendo útil para melhor elaboração de monitoramento e políticas públicas para maior controle dessas áreas.

O estudo demonstrou que principalmente nos últimos anos entre 2014 e 2020 houve grande evolução da mineração, principalmente pela escavação mecânica, atingindo as cabeceiras das bacias, com cavas profundas em saprólitos, o que aumenta o potencial de contaminação em toda bacia dos recursos hídricos principalmente por arsênio.

Além das bandas espectrais, índices espectrais, de vegetação (NDVI), água (NDWI), solo (DBSI, NDBI, BI) com diferentes parâmetros estatísticos devem ser considerados para classificar imagens de áreas de mineração de ouro, para aumentar acurácia do modelo da classificação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos fundos de pesquisas: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- BLASCHKE, T. Object-based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65: 2-16. 2010.
- BLASCHKE, T.; HAY, G.J.; KELLY, M.; LANG, S.; HOFMANN, P.; ADDINK, E.; QUEIROZ FEITOSA, R.; VAN DER MEER, F.; VAN DER WERFF, H.; VAN COILLIE,

- F.; TIEDE, D. Geographic object-based image analysis - towards a new paradigm. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 87: 180–191. 2014
- BOUSBIH, S.; ZRIBI, M.; PELLETIER, C.; GORRAB, A.; LILI-CHABAANE, Z.; BAGHDADI, N.; AISSA, N.; BEN, B. Soil texture estimation using radar and optical data from Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 11:1520. 2019.
- BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, 45:5-32.2001. DOI:10.1023/A:1010933404324
- CHEN, W.; LI, X.; HE, H.; WANG, L. A review of fine-scale land use and land cover classification in open-pit mining areas by remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 10: 01-19. 2018.
- CORBETT, T.O.; FAIRCHEALLAIGH, C.; REGAN, A. 'Designated areas' and the regulation of artisanal and small-scale mining. *Land Use Policy*, 68: 393-401. 2017.
- DAHLBERG, E.H. Small-scale gold mining. A manual based on experience in Suriname. Intermediate Technology Development Group (London): 51 p. 1984.
- DAOUST, C. Caractérisation stratigraphique, structurale et géochimique du district minéralisé de Rosebel (Suriname) dans le cadre de l'évolution géodynamique du Bouclier Guyanais. PhD Thesis. Université du Québec à Montréal (Montréal): 330 pp. 2016.
- DE VLETTER, D.; HAKSTEGE, A.L. The search for gold in Suriname. In: WONG, TH.E.; DE VLETTER, D.; KROOK, L.; ZONNEVELD, J.; VAN LOON, A. (eds): *The history of earth sciences in Suriname*. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences & Netherlands Institute of Applied Geoscience (Amsterdam): 311–350. 1998.
- DEMATTÊ, J.A.; DOTTO, A.C.; PAIVA, A.F.; SATO, M.V.; DALMOLIN, R.S.; MARIA DO SOCORRO, B.; ... DO COUTO, H.T.Z. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma*, 354: 113793, 2019.
- DENG, Y.; WU, C.; LI, M.; CHEN, R. RNDISI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 39: 40-48. 2015.
- ESPEJO, J.C.; MESSINGER, M.; ROMÁN-DAÑOBAYTIA, F.; ASCORRA, C.; FERNANDEZ, L. E.; SILMAN, M. Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sensing*, 10: 1-17. 2018.
- FRITZ, M.; MCQUILKEN, J.; COLLINS, N.; WELDEGIORGIS, F. Global trends in artisanal and small-scale mining (ASM): A review of key numbers and issues. In: *Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development (IGF)*. Winnipeg: IISD. 2017.
- GALLWEY, J.; ROBIATI, C.; COGGAN, J.; VOGT, D.; EYRE, M. A Sentinel-2 based multispectral convolutional neural network for detecting artisanal small-scale mining in

- Ghana: Applying deep learning to shallow mining. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111970. 2020.
- GAPAIS, D.; ALIMOENADI, G.; BALRAADJSING, N.; POUPEAU, B. The Rosebel gold mining district (Trans-Amazonian belt, Suriname), a new structural framework. *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 192, 32, 2021. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021021>.
- GLOBAL TRENDS IN ARTISANAL AND SMALL-SCALE MINING (ASM): A REVIEW OF KEY NUMBERS AND ISSUES Secretariat hosted by Secretariat funded by, 2014.
- HILSON, G.; MACONACHIE, R. Artisanal and small-scale mining and the sustainable development goals: opportunities and new directions for sub-Saharan Africa. *Geoforum*, 62: 1–17. 2020.
- ISIDRO, C.; MCINTYRE, N.; LECHNER, A.; CALLOW, I. Applicability of earth observation for identifying small-scale mining footprints in a wet tropical region. *Remote Sensing*, 9:935- 945. 2017.
- JEBUR, M. N.; MOHD SHAFRI, H. Z.; PRADHAN, B.; TEHRANY, M. S. Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban land cover extraction using SPOT 5 imagery. *Geocarto International*, 29: 792-806. 2014.
- KIOE-A-SEN, N. M. E.; VAN BERGEN, M. J.; WONGL, T. E. W.; KROONENBERG, S. B. GOLD deposits of Suriname: geological context, production and economic significance. *Netherlands Journal of Geosciences*, 95: 429-445. 2016.
- KROONENBERG, S.B.; DE ROEVER, E.W.F.; FRAGA, L.M.; REIS, N.J.; FARACO, T.; LAFON, J.M.; CORDANI, U.; WONG, T.E. Paleoproterozoic evolution of the Guiana Shield in Suriname: A revised model. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw* 95, 491–522. 2016. <https://doi.org/10.1017/njg.2016.10>
- KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A. *Caret: Classification and Regression Training*. <https://Cran.R-Project.Org/Package=Caret>. 2012.
- LACAUX, J.P.; TOURRE, Y.M.; VIGNOLLES, C.; NDIONE, J.A.; LAFAYE, M. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106: 66–74. 2007.
- LI, H.; LIU, Q. Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery. *Int. Conf. Earth Obs. Data Process. Anal.* 7285, 728503. 2008.
- LIAW, A.; AND WIENER, M. Classification and regression by Random Forest. *R news*, 2: 18-22. 2002.
- LOBO, F. L.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; NOVO, E.M.L. DE M.; CARLOS, F.M.; BARBOSA, C.C.F. Mapping mining areas in the Brazilian amazon using MSI/Sentinel-2 imagery (2017). *Remote Sens (Basel)* 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10081178>

- LOBO, F.L.; COSTA, M.; NOVO, E.M.L.D.M.; TELMER, K. Effects of small-scale gold mining tailings on the underwater light field in the Tapajós river basin, Brazilian amazon. *Remote Sensing*, 9: 861, 2017.
- LOBO, F.L.; COSTA, M.P.; NOVO, E.M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, 157:170-184, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>
- LOBO, F.L.; DE MORAES NOVO, E.M.L.; BARBOSA, C.C.F.; DE VASCONCELOS, V. H. F. (2018). Monitoring Water Siltation Caused by Small-Scale Gold Mining in Amazonian Rivers Using Multi-Satellite Images. In *Limnology-Some New Aspects of Inland Water Ecology*. IntechOpen. 2018.
- LOBO, F.L; NOVO, E.M.L.; BARBOSA, C.C.F.; GALVÃO, L.S., Reference spectra to classify Amazon water types. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 3422–3442, 2012. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.627391>
- MCFEETERS S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1425, 1996.
- MILLER, J. R.; VILLARROEL, L. F. Bolivia: Mining, River Contamination, and Human Health. In: *Encyclopedia of Environmental Health*. 2. ed. Elsevier. 436–455. 2019.
- NGUYEN, C.T., CHIDTHAISONG, A., DIEM, P.K., HUO, L.Z. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in southeast asia using landsat 8. *Land (Basel)* 10, 1–18, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- OBODAI, J.; ADJEI, K.A.; ODAI, S.N.; LUMOR, M. Land use/land cover dynamics using landsat data in a gold mining basin-the Ankobra, Ghana. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13: 247-256, 2019.
- OFOSU, G.; DITTMANN, A.; SARPONG, D.; BOTCHIE, D. Socio-economic and environmental implications of Artisanal and Small-scale Mining (ASM) on agriculture and livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 106: 210-220. 2020.
- OTTENBROS, I.B.; BOERLEIDER, R. Z.; JUBITANA, B.; ROELEVELD, N.; & SCHEEPERS, P. T. J. (2019). Knowledge and awareness of health effects related to the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in Suriname. *Environment international*, 122, 142-150
- OUBOTER, P.E. Review of mercury pollution in Suriname. *Academic Journal of Suriname*, 6: 531-543. 2015.
- ÖZELKAN, E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29: 1759-1769, 2020.
- PETERSON, Garry D.; HEEMSKERK, Marieke. Deforestation and forest regeneration following small-scale gold mining in the Amazon: the case of Suriname. *Environmental Conservation*, 28: 117-126, 2001.

- RAHM, M.; JULLIAN, B.; LAUGER, A.; DE CARVALHO, R.; VALE, L.; TOTARAM, J.; VIEIRA, R. Monitoring the impact of gold mining on the forest cover and freshwater in the Guiana Shield. WWF, p.60, 2014. Disponível em: http://sbbsur.com/wp-content/uploads/2015/11/gold_mining_final_report_site2.pdf. Acessado em: 20/01/2020.
- RASUL, A.; BALZTER, H.; IBRAHIM, G. R. F.; HAMEED, H. M.; WHEELER, J.; ADAMU, B.; & NAJMADDIN, P. M. Applying built-up and bare-soil indices from Landsat 8 to cities in dry climates. *Land*, 7: 81. 2018.
- SBB-FOUNDATION FOR FOREST MANAGEMENT AND PRODUCTION CONTROL. Forest cover monitoring in Suriname using remote sensing techniques for the period 2000-2015. 2017. Paramaribo, Suriname. Disponível em: http://sbbsur.com/wp-content/uploads/2019/03/technicalreportlulcmaps_final_updated20190326_frel.pdf. Acessado em: 20/01/2020.
- SECCATORE, JACOPO; DE THEIJE, MARJO. Socio-technical study of small-scale gold mining in Suriname. *Journal of Cleaner Production*, 144: 107-119, 2017.
- SOUZA-FILHO, P. W. M.; NASCIMENTO, W. R.; SANTOS, D. C.; WEBER, E. J.; SILVA, R. O.; SIQUEIRA, J. O. A GEOBIA approach for multitemporal land-cover and land-use change analysis in a tropical watershed in the southeastern Amazon. *Remote Sensing*, 10: 1683. 2018.
- SUN, H.; CHENG, H.; LIN, L.; DENG, K.; CUI, X. Bioaccumulation and sources of metal (loid) s in lilies and their potential health risks. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 151: 228–235, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.063>.
- TEAM, R. C. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: Available at: <https://www.R-project.org/>. 2020.
- TEIXEIRA, M.C.; SANTOS, A.C.; FERNANDES, C.S.; NG, J.C. (2020). Arsenic contamination assessment in Brazil—Past, present and future concerns: A historical and critical review. *Science of the Total Environment*, 730: 138217, 2020.
- VELLENGA. Disponível online: <https://oeco.org.br/reportagens/28031-suriname-garimpeiros-brasileiros-destroem-florestas-a-procura-de-ouro/> (Acessado em 16 de abril de 2022).
- VERBRUGGE, B.; GEENEN, S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy. *The Extractive Industries and Society*, 6: 413-423, 2019.
- WANHUI, C.; LIANGYUN, LIU; CHAO, Z.; JIHUA, WANG; JINDI, W.; YUCHUN, PAN. Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multi-temporal TM images, in: IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. IEEE, pp. 3379–3382, 2004. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370429>.

APÊNDICE

Tabela 1A-Descrição das características dos perfis coletados e observados dos solos na região norte do Suriname

Ponto	Classe			Características gerais	Uso e cobertura do solo	Altitude (m)	Declividade (%)	Relevo
	SiSCS Grupo	SiBCS	WRB					
Coletados								
1	15	PVAd – Argissolo Amarelo Distrófico típico	Chromic Acrisol (Loamic, Dystric)	Moderadamente drenado, lençol freático > 2m, Bt a 60 cm, textura média, cor amarelada.	Floresta secundária	8	3-8	Suave ondulado
2	14	Neossolo Quartzarênico Órtico típico	Chromic Acrisol (Arenic, Dystric)	Moderadamente drenado, horizontes superficiais textura arenosa fina cor esbranquiçada e horizonte subsuperficial > 60 cm com textura areia-franca coloração amarela.	Floresta primária	22	< 3	Plano
3	6	GXve - Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol	Naturalmente mal drenado, com drenagem artificial, lençol freático < 50 cm, argiloso, Ta, presença de mosqueados.	Agricultura familiar – plantio de banana	0	3-8	Suave ondulado
4	5	RQo - Neossolo Quartzarênico Órtico típico	Dystric Arenosol	Acentuadamente bem drenado, textura arenosa fina.	Agricultura familiar – plantio de beringela	7	3-8	Suave ondulado
5	1	RQoe – Neossolo Quartzarênico Órtico Eutrófico carbonático	Calcaric Eutric Arenosol	Bem drenados, arenoso com predomínio de areia grossa, presença de conchas calcárias.	Exploração para aplicação como corretivo agrícola	5	3-8	Suave ondulado
6	16	GXbd – Gleissolo Háplico Tb distrófico	Dystric Gleysol	Naturalmente mal drenado, com drenagem artificial, argilo-siltoso, Tb, alto teor de MO.	Agricultura familiar – plantio açaí do brasil	8	3-8	Suave ondulado

Ponto	Classe			Características gerais	Uso e cobertura do solo	Altitude (m)	Declividade (%)	Relevo
	SiSCS Grupo	SiBCS	WRB					
7	11/2	GZn – Gleissolo Sálco Sódico típico	Tidalic Sodic Gleysol	Muito mal drenado, lençol freático a 50 cm, alta salinidade.	Sem uso agrícola – regeneração	2	3-8	Suave ondulado
8	16	FFc – Plintossolo Pétrico Concrécionário êndico	Pisoplinthic Plinthosol	Moderada drenagem, concreções (bauxita), distrófico.	Vegetação primária	18	20-45	Forte ondulado
9	13	GXbd – Gleissolo Háptico Tb distrófico	Dystric Gleysol	Moderada drenagem, lençol freático a 1m, Horiz. glei a 80 cm	Agricultura familiar – cultivo banana	7	< 3	Plano
10	25	LVd – Latossolo Vermelho Distrófico típico fase epipedregosa	Rhodic Skeletic Ferrasol (Dystric)	Bem drenado, presença calhaus da superfície até 40 cm de profundidade, estrutura em blocos angulares, com pouca cerosidade.	Floresta primária	39	8-20	Ondulado
11	20	RQo – Neossolo Quartzarênico Órtico típico	Dystric Arenosol	Excessivamente drenado, arenoso com predomínio areia grossa, cor esbranquiçada.	Agricultura de Shifiting cultivation	47	3-8	Suave ondulado
12	9	Neossolo Flúvico Tb Eutrófico	Fluvisol (clay loam)	Bem drenado, textura média, estratificação de camadas.	Vegetação secundária – área de mineração de bauxita	14	3-8	Suave ondulado
13	15	PAd – Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico	Chromic Acrisol (Loamic)	Mal drenado, Bt a 60 cm, presença de mosqueados a 1 m, lençol freático a 1 m.	Pastagem/Agricultura	13	3-8	Suave ondulado
14	4	GXve – Gleissolo Háptico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol	Naturalmente muito mal drenados, com drenagem artificial, muito argiloso, Ta, lençol freático a 1 m grande parte do ano.	Agricultura empresarial – plantio de banana	3	3-8	Suave ondulado
15	5	Argissolo Amarelo Tb Distrófico	Chromic Acrisol (Dystric)	Acentuadamente bem drenado, textura arenosa fina nas camadas superficiais, Bt a 60 cm com textura média.	Agricultura familiar – plantio de beringela	8	3-8	Suave ondulado

Ponto	Classe			Características gerais	Uso e cobertura do solo	Altitude (m)	Declividade (%)	Relevo
	SiSCS Grupo	SiBCS	WRB					
16	12	GXve – Gleissolo Háplico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol	Naturalmente mal drenado, com drenagem artificial, textura argilosa, Ta, lençol freático a 1,5 m.	Agricultura empresarial de grande escala – plantio de banana	2	3-8	Suave ondulado
17	12	GXve - Háplico Ta Eutrófico	Eutric Gleysol	Naturalmente mal drenado, textura argilosa, Ta, lençol freático na superfície do solo.	Agricultura empresarial – cultivo de arroz	1	< 3	Plano
Observados								
18	19	Espodossolo Humilúvico	Albic Podzol (Arenic)	Arenoso com predomínio de areia fina esbranquiçada, lençol freático a 80 cm, B espódico a mais 1,5 m.	Floresta savana, com gramíneas e pequenos arbustos	20	3-8	Suave ondulado
19	32	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico	Chromic Plinthic Ferrasol (Dystric)	Solo bem drenado, Bw profundo, presença de plintitas e petroplintitas contínua em todo horizonte.	Floresta nativa – região de exploração de ouro	23	8-20	Ondulado
20	24	Latossolo Vermelho Distrófico petroplíntico	Rhodic Petroplinthic Ferrasol (Dystric)	Bem drenado, presença de concreções ferruginosas.	Floresta nativa – região de exploração de ouro	33	8-20	Ondulado
21	32	Plintossolo Pétrico concrecionário Mina - Bauxita	Pisoplinthic Plinthosol	Horizonte concrecionário com concreções de alumínio (Bauxita) contínuas em todo horizonte.	Floresta em regeneração – antiga área de exploração de bauxita	17	8-20	Ondulado
22	7	Gleissolo Háplico Ta	Gleysol	Muito mal drenado, lençol freático a 50 cm, solo argiloso, Ta.	Agricultura familiar – plantio de banana e mandioca	6	3-8	Suave ondulado

Ponto	Classe			Características gerais	Uso e cobertura do solo	Altitude (m)	Declividade (%)	Relevo
	SiSCS Grupo	SiBCS	WRB					
23	7	Gleissolo Háptico	Gleysol	Lençol freático a 50 cm.	Agricultura familiar – cultivo de olerícolas	6	3-8	Suave ondulado
24	11	Gleissolo Háptico	Gleysol	Lençol freático a 80 cm, gletização.	Plantio de bambu	2	<3	Plano
25	15	Espodossolo Humilúvico	Albic Podzol (Arenic)	Horizonte A com 2 cm, B Espódico a 70 cm.	Pastagem natural	8	3-8	Suave ondulado
26	16	Plintossolo	Plinthosol	Presença de plintitas	Floresta primária	14	8-20	Ondulado
27	19	Espodossolo Húmiluvico	Albic Podzol (Arenic)	B espódico a 1,8 m, lençol freático a 70 cm.	Floresta de savana	15	< 3	Plano
28	5	Neossolo Quartzarênico	Dystric Arenosol	Solos textura arenosa, bem drenado, coloração amarela	Agricultura familiar – plantio de mandioca	16	3-8	Suave ondulado

ANEXO

Tabela 1A – Propriedades físicas e químicas de perfis de solos da ISRI classificados com a WRB e SiBCS

Prof. Inicial	Prof. final	Horiz.	Argila	Silte	Areia	CTC_T	MO	pH Água)
			(%)			(cmol)	dg kg ⁻¹	
P1 - ARENOSOLS CAMBIC - Neossolo Quartzarênico hidromórfico típico								
0	20	Ap	4	4	92	9	1,2	4
20	30	AC	3	6	91	5	0,8	4,8
30	40	Cg1	4	5	91	4	0,5	4,8
40	65	Cg2	13	5	82	10	0,3	4,9
65	90	Cg3	11	5	84	6	0,3	4,8
P2 - ACRISOLS PLINTHIC - Argissolo Amarelo Distrófico plintossólico								
0	16	Ah1	16	55	29	10,8	0,3	4,8
16	29	Ah2	22	54	24	10,8	0,2	5
29	64	Bt1	36	49	15	12,6	1,3	4
64	94	Bt2	41	41	18	12,6	1,0	4
94	120	Btv1	39	43	18	9,7	0,8	4,5
120	160	Btv2	32	45	23	9,7	0,4	4,8
P3 - PODZOLS HUMIC - Espodossolo Humilúvico Órtico típico								
1	13	Ah	4	13	83		2,0	4,5
13	92	E	1	3	96		1,3	5,5
92	105	Bh	3	12	85	44	0,9	4,5
105	123	Bms1	8	20	72		0,6	4,7
123	150	Bms2	7	18	75		0,6	4,6
P4 - ARENOSOLO ALBIC – Neossolo Quartzarênico Órtico típico								
0	18	Ah	1	4	95	5,5		5,1
18	86	E1	1	1	98	1	4,4	3,9
86	160	E2	1	2	97	0,6		4,8
P5 - FERRASOLS PLINTHIC - Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico textura média								
0	8	Ah1	17	11	72	11	1,7	4
8	45	Ah2	31	10	59	7	0,8	5

Prof. Inicial	Prof. final	Horiz.	Argila	Silte	Areia	CTC_T	MO	pH Água)
			(%)			(cmol)	dg kg ⁻¹	
45	78	BA	31	7	62	4	0,2	4,5
78	105	Bu	32	5	63	2,6	0,2	4,5
105	165	Bv	30	6	64	2,6	0,1	4,5
P6 - GLEYSOLS - Gleissolo Háptico Tb Distrófico cambissólico								
0	5	Ah	39,4	18,2	42,4	13	0,6	4,3
5	20	AC1	30,9	14,8	54,3	9,3	--	4,3
20	37	Clj	48,3	11,8	39,9	14,9	--	4,5
37	80	Cl1	55,8	42	2,2	19,9	2,4	4,1
80	120	Cl2	54,5	39,6	5,9	19,4	0,7	4,9
P7 - FERRASOLS - Latossolo Distrófico típico								
0	10	Ah	44,8	29,9	25,3	2,6	--	5,8
10	62	AB	51,9	27,9	20,2	--	2,0	4,5
62	120	Bo1	60,9	31,6	7,5	--	0,2	4,7
120	155	Bo2	35,8	53,6	10,6	0,6	0,6	4,7
P8 - ARENOSOLS - Neossolo Quatzarênico Órtico típico								
10	30	AC	0	1,9	98,1	--	0,45	4,3
30	170	C	0,9	1,3	97,8	--	0,01	5,7