



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

**Estudo Biogeoquímico e Estratégias de  
Recuperação de Solos com Teores Críticos de  
Metais Pesados, Sob a Influência de Uma Unidade  
de Tratamento Metalúrgico, nas Bacias de  
Drenagem de Dois Afluentes do Rio São Francisco  
(Minas Gerais, Brasil)**

**Nuno Filipe Bento Dias**

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Doutora Rita Maria Ferreira da Fonseca

**Mestrado em Ciências e Tecnologias da Terra, da Atmosfera e do Espaço**

Área de especialização: *Reabilitação de Ambientes Degradados*

Dissertação

Évora, 2014



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

**Estudo Biogeoquímico e Estratégias de  
Recuperação de Solos com Teores Críticos de  
Metais Pesados, Sob a Influência de Uma Unidade  
de Tratamento Metalúrgico, nas Bacias de  
Drenagem de Dois Afluentes do Rio São Francisco  
(Minas Gerais, Brasil)**

**Nuno Filipe Bento Dias**

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Doutora Rita Maria Ferreira da Fonseca

**Mestrado em Ciências e Tecnologias da Terra, da Atmosfera e do Espaço**

Área de especialização: *Reabilitação de Ambientes Degradados*

Dissertação

Évora, 2014



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer à minha família, presente mesmo longe, pelo seu apoio nas horas boas e menos boas.

À minha professora e orientadora Rita Fonseca, que permitiu que fizesse parte da equipa neste projecto e que com a sua paciência e boa vontade ouviu todas as nossas dúvidas e ideias. A todos os que nos ajudaram neste projecto, à Catarina, à Sandra do Laboratório de Geociências, que com a sua boa disposição e voz amiga transformaram longos dias de trabalho no laboratório em mais do que isso.

Gostaria ainda de agradecer à Luísa, por ter partilhado comigo não apenas o trabalho, mas também as suas alegrias e progressos.



# Índice

	Pág.
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. Introdução	1
2. Enquadramento da Área em Estudo	15
2.1. Enquadramento Geográfico	17
2.2. Enquadramento Geológico	20
2.3. Enquadramento Climático	22
2.4. Solo e Vegetação	24
3. Metodologias	27
3.1. Amostragem	29
3.2. Análises Laboratoriais	35
3.2.1. Ensaio Químicos	36
3.2.2. Ensaio Físicos	42
4. Resultados	47
4.1. Tipos de Solo	49
4.2. Parâmetros Físico-Químicos (pH e Eh)	52
4.3. Digestão Parcial	53
4.4. Extração Sequencial	56
4.5. Análise Elementar de CHNS	57
4.6. Fósforo Total	59
4.7. Fósforo Assimilável	60
4.8. Ensaio de Lixiviação	61
4.9. Nutrientes	65
4.10. Textura	68
4.11. Densidade (Aparente e das Partículas) e Porosidade	69
5. Discussão	71
5.1. Tipos de Solo	73
5.2. Digestão Parcial e Determinação do Grau de Contaminação Local	74
5.2.1. Digestão Parcial	74
5.2.2. Factor de Enriquecimento	82
5.2.3. Índice de Geoacumulação	86

5.2.4.	Factor de Contaminação	88
5.3.	Parâmetros Físico-Químicos	90
5.4.	Extracção Sequencial	93
5.5.	Análise Elementar de CHNS	97
5.5.1.	Carbono	97
5.5.2.	Azoto	98
5.5.3.	Enxofre	100
5.5.4.	Índice C/N	101
5.6.	Ensaio de Lixiviação	102
5.7.	Nutrientes	106
5.7.1.	Cálcio	106
5.7.2.	Potássio	107
5.7.3.	Magnésio	109
5.7.4.	Fósforo	110
5.7.5.	Cobre	112
5.7.6.	Ferro	114
5.7.7.	Manganês	115
5.7.8.	Molibdénio	117
5.7.9.	Zinco	117
5.7.10.	Índice de Nutrientes	119
5.8.	Textura	121
5.9.	Porosidade	123
6.	Remediação	125
7.	Conclusões	145
8.	Referências Bibliográficas	153
	Anexos	167

# Índice de Figuras

	Pág.
<b>Figura 1.1:</b> Técnicas de fitorremediação.	7
<b>Figura 1.2:</b> Localização das principais minas cujo minério é processado na unidade industrial de Três Marias.	9
<b>Figura 1.3:</b> Localização dos antigos aterros de resíduos, construídos anteriormente à Barragem Velha.	10
<b>Figura 1.4:</b> Localização dos depósitos de resíduos da unidade de Três Marias da Votorantim Metais S.A..	12
<b>Figura 2.1:</b> Localização da área em estudo.	17
<b>Figura 2.2:</b> Principais sub-bacias do rio São Francisco.	19
<b>Figura 2.3:</b> Localização da área em estudo no cratão de São Francisco e na carta geológica.	21
<b>Figura 2.4:</b> Classes climáticas no cratão de São Francisco.	23
<b>Figura 2.5:</b> Cobertura vegetal na bacia do rio São Francisco.	25
<b>Figura 2.6:</b> Vegetação típica do Cerrado.	25
<b>Figura 2.7:</b> Esquematização das diferentes fisionomias do Cerrado.	26
<b>Figura 3.1:</b> Delimitação das áreas contaminadas (a verde) e degradadas (a vermelho) na área industrial da Votorantim Metais.	29
<b>Figura 3.2:</b> Áreas delimitadas para estudos complementares de descontaminação.	30
<b>Figura 3.3:</b> Amostragem de solos na área em estudo com trado.	31
<b>Figura 3.4:</b> Localização das amostras de solos recolhidas nas áreas A0 e A1.	32
<b>Figura 3.5:</b> Localização das amostras de solos recolhidas nas áreas A3, A4 e A5	33
<b>Figura 3.6:</b> Aspecto geral dos solos da área em estudo.	34

<b>Figura 3.7:</b> Digestor de microondas de alta pressão no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.	36
<b>Figura 3.8:</b> Espectrómetro de emissão óptica com fonte indutiva de plasma (ICP-OES) no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.	37
<b>Figura 3.9:</b> Câmara de radiação ultravioleta (UV) do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.	40
<b>Figura 3.10:</b> Analisador elementar no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.	40
<b>Figura 3.11:</b> Espectrómetro de absorção molecular UV/Visível do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.	41
<b>Figura 3.12:</b> Pipeta de Andersen do Laboratório de Geociências da Universidade de Évora.	43
<b>Figura 3.13:</b> Diagrama triangular de Atterberg utilizado para classificação das amostras de solo.	44
<b>Figura 4.1:</b> Solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo.	49
<b>Figura 4.2:</b> Solo do tipo Gleissolo Háptico.	50
<b>Figura 4.3:</b> Solo Litólico.	50
<b>Figura 5.1:</b> Localização geográfica dos diferentes tipos de solo na área em estudo.	73
<b>Figura 5.2:</b> Concentração de arsénio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A0 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).	75
<b>Figura 5.3:</b> Concentração de arsénio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A1 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).	75
<b>Figura 5.4:</b> Concentração de arsénio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A3 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).	76
<b>Figura 5.5:</b> Concentração de arsénio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A4 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).	77
<b>Figura 5.6:</b> Concentração de arsénio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A5 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).	77

<b>Figura 5.7:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A0 (amostras CA0-1B e CA0-1C).	79
<b>Figura 5.8:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A0 (amostras CA0-2C, CA0-3B e CA0-3C).	79
<b>Figura 5.9:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A1.	80
<b>Figura 5.10:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A3.	80
<b>Figura 5.11:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A4.	81
<b>Figura 5.12:</b> Variação em profundidade dos teores de zinco na área A5.	81
<b>Figura 5.13:</b> Categorias do factor de enriquecimento para os solos da área em estudo.	84
<b>Figura 5.14:</b> Factor de enriquecimento para todos os solos da área em estudo. Valores apresentados em escala logarítmica.	85
<b>Figura 5.15:</b> Somatório do número de ocorrências em cada categoria do factor de enriquecimento.	85
<b>Figura 5.16:</b> Categorias do Índice de Geoacumulação nos solos da área em estudo.	87
<b>Figura 5.17:</b> Índice de Geoacumulação para os solos da área em estudo.	87
<b>Figura 5.18:</b> Somatório do número de ocorrências em cada categoria do Índice de Geoacumulação (IGL).	88
<b>Figura 5.19:</b> Comparação dos valores de pH com o Índice de Geoacumulação (IGL) calculado, para todas as amostras de solo das áreas A1, A3, A4 e A5.	91
<b>Figura 5.20:</b> Comparação dos valores de pH com os valores óptimos para uso agrícola (Brady & Weil <i>in</i> Brown, 2011).	92
<b>Figura 5.21:</b> Fracções extraídas em cada uma das fases da extracção sequencial, para o cádmio, crómio, cobre, ferro e manganês.	94
<b>Figura 5.22:</b> Fracções extraídas para cada uma das fases de extracção sequencial, para o níquel, chumbo e zinco.	95

<b>Figura 5.23:</b> Comparação dos teores obtidos na primeira fase de extracção sequencial com os limites legislados do somatório de todas as fracções extraíveis, para os solos (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	96
<b>Figura 5.24:</b> Percentagens de carbono obtidas para as amostras de solos.	98
<b>Figura 5.25:</b> Dinâmica do azoto no solo.	98
<b>Figura 5.26:</b> Percentagens de azoto obtidas para as amostras de solos.	99
<b>Figura 5.27:</b> Dinâmica do enxofre no solo.	100
<b>Figura 5.28:</b> Percentagens de enxofre obtidas para as amostras de solos.	101
<b>Figura 5.29:</b> Comparação dos valores obtidos para os solos da área em estudo para Índice C/N com o nível óptimo de Brady & Weil <i>in</i> Brown (2011), definido pelos limites inferior e superior.	102
<b>Figura 5.30:</b> Valores de cádmio obtidos nos ensaios de lixiviação, para todas as áreas.	103
<b>Figura 5.31:</b> Valores de zinco obtidos nos ensaios de lixiviação, para todas as áreas.	104
<b>Figura 5.32:</b> Comparação dos valores obtidos nos ensaios de lixiviação com os valores extraídos na primeira fase da extracção sequencial.	106
<b>Figura 5.33:</b> Teores de cálcio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola ( <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	107
<b>Figura 5.34:</b> Dinâmica do potássio no solo.	108
<b>Figura 5.35:</b> Teores de potássio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Horneck <i>et al.</i> , 2011).	108
<b>Figura 5.36:</b> Teores de magnésio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Horneck <i>et al.</i> , 2011).	109
<b>Figura 5.37:</b> Dinâmica do fósforo no solo.	110
<b>Figura 5.38:</b> Comparação dos valores de fósforo total e fósforo assimilável determinados nos solos da área.	111

<b>Figura 5.39:</b> Teores de fósforo obtidos nos solos e comparação com os valores de referência (Kepner <i>et al.</i> , 2003).	112
<b>Figura 5.40:</b> Biodisponibilidade dos nutrientes de acordo com o pH do solo.	113
<b>Figura 5.41:</b> Teores de cobre obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	114
<b>Figura 5.42:</b> Teores de ferro obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola ( <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	115
<b>Figura 5.43:</b> Teores de manganês obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	116
<b>Figura 5.44:</b> Teores de Molibdénio obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola ( <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	117
<b>Figura 5.45:</b> Teores de zinco obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; <i>Department of Agriculture &amp; Cooperation, Government of India</i> ).	118
<b>Figura 5.46:</b> Classificação textural dos solos da área em estudo segundo a classificação de Atterberg.	122
<b>Figura 5.47:</b> Relação entre a porosidade e o teor em argila das amostras estudadas.	124
<b>Figura 6.1:</b> Aplicação da solidificação/estabilização na remediação de solos contaminados.	127
<b>Figura 6.2:</b> Processo de vitrificação <i>in situ</i> .	128
<b>Figura 6.3:</b> Processo de <i>flushing</i> do solo.	129
<b>Figura 6.4:</b> Processo de lavagem do solo.	130
<b>Figura 6.5:</b> Processo de cobertura de solos contaminados.	131
<b>Figura 6.6:</b> Processo de desadsorção térmica.	131
<b>Figura 6.7:</b> Processo de electrocinese.	132
<b>Figura 6.8:</b> Espécies vegetais escolhidas para a fitoextração e fitoestabilização da área.	137

<b>Figura 6.9:</b> Utilização de hidrosementeira.	139
<b>Figura 6.10:</b> Sementeira manual com cobertura de <i>mulch</i> .	140
<b>Figura 6.11:</b> Sementeira sob rede ou geotêxtil.	140
<b>Figura 6.12:</b> Entrançados vivos em malha diagonal.	141
<b>Figura 6.13:</b> Faxina viva na estabilização de uma margem fluvial.	141
<b>Figura 6.14:</b> Faxinas vivas na estabilização de encostas.	142
<b>Figura 6.15:</b> Ramagem viva em zonas ravinosas.	142
<b>Figura 6.16:</b> Muros de suporte vivo em madeira tipo <i>Cribwall</i> .	143
<b>Figura 6.17:</b> Degraus vivos.	143
<b>Figura 6.18:</b> Grade viva.	144
<b>Figura 6.19:</b> Células sintéticas em favo de mel.	144

## Índice de Tabelas

	Pág.
<b>Tabela 2.1:</b> Principais características da região do Alto São Francisco.	20
<b>Tabela 4.1:</b> Tipos de solo amostrados na área em estudo.	51
<b>Tabela 4.2:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de pH e Eh dos solos.	53
<b>Tabela 4.3:</b> Valores de referência para a qualidade dos solos.	54
<b>Tabela 4.4:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana dos teores de metais pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) e metalóides (As) nos solos das áreas A0 e A1.	54
<b>Tabela 4.5:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana dos teores de metais pesados (cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e metalóides (arsénio) nos solos das áreas A3 e A4.	55
<b>Tabela 4.6:</b> Valores mínimos, máximos, médios e medianos dos teores de metais pesados (cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e metalóides (arsénio) nos solos da área A5.	55
<b>Tabela 4.7:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana da percentagem extraída para cada elemento metálico (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) nas diferentes fases da extracção sequencial.	56
<b>Tabela 4.8:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana obtidos para o carbono (C), hidrogénio (H), azoto (N) e enxofre (S) por análise elementar dos solos.	58
<b>Tabela 4.9:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de fósforo total determinados nos solos.	59
<b>Tabela 4.10:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de fósforo assimilável nos solos.	60
<b>Tabela 4.11:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras das áreas A0 e A1.	62

<b>Tabela 4.12:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras das áreas A3 e A4.	62
<b>Tabela 4.13:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras da área A5.	63
<b>Tabela 4.14:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras das áreas A0 e A1.	64
<b>Tabela 4.15:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras das áreas A3 e A4.	64
<b>Tabela 4.16:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras da área A5.	65
<b>Tabela 4.17:</b> Teores correspondentes às várias classes de fertilidade do solo, para macro e micronutrientes.	66
<b>Tabela 4.18:</b> Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos das áreas A0 e A1.	67
<b>Tabela 4.19:</b> Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos das áreas A3 e A4.	67
<b>Tabela 4.20:</b> Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos da área A5.	68
<b>Tabela 4.21:</b> Percentagens mínima, máxima, média e mediana de areia, limo e argila nos solos das diferentes áreas.	69
<b>Tabela 4.22:</b> Valores mínimos, máximos, de média e mediana de densidade aparente, densidade das partículas e porosidade dos solos.	70
<b>Tabela 5.1:</b> Categorias de classificação do factor de enriquecimento (FE).	83

<b>Tabela 5.2:</b> Categorias de classificação do Índice de Geoacumulação (IGL).	86
<b>Tabela 5.3:</b> Factores de contaminação nos principais elementos metálicos nos solos da área em estudo.	89
<b>Tabela 5.4:</b> Categorias de classificação do factor de contaminação (FC).	89
<b>Tabela 5.5:</b> Valores determinados para o Índice de Nutrientes (IN) nas várias áreas, para os macro e micronutrientes.	120
<b>Tabela 5.6:</b> Relação entre as propriedades físicas do solo e as fracções granulométricas.	121
<b>Tabela 6.1:</b> Espécies com capacidades fitoextractoras passíveis de serem utilizadas na área em estudo.	135
<b>Tabela 6.2:</b> Espécies com capacidades de fitoestabilização passíveis de serem utilizadas na área em estudo.	136



# **Estudo biogeoquímico e estratégias de recuperação de solos com teores críticos de metais pesados, sob a influência de uma unidade de tratamento metalúrgico, nas bacias de drenagem de dois afluentes do Rio São Francisco (Minas Gerais, Brasil)**

## **RESUMO**

O funcionamento de indústrias metalúrgicas de produção de ligas metálicas pode pôr em risco toda a área envolvente, nomeadamente no que diz respeito à qualidade das águas (superficiais e subterrâneas), dos solos e do ar, sempre que não existam infra-estruturas e planos adequados de gestão destes resíduos. No caso em estudo, a unidade industrial situa-se na bacia do rio São Francisco, no estado brasileiro de Minas Gerais, e nos mais de quarenta anos de funcionamento tem produzido inúmeros problemas ambientais.

Este estudo tem como objectivos a identificação dos principais contaminantes dos solos da envolvente, a definição da área contaminada e a determinação das concentrações de nutrientes, de forma a avaliar a eficácia de projectos futuros de recuperação. Deste modo, é ainda mostrado como a fitorremediação poderia ser utilizada como uma técnica de recuperação destes solos.



***Biogeochemical study and recuperation strategies for high heavy metal content soils under the influence of a metallurgical unit in the drainage areas of two São Francisco river tributaries (Minas Gerais, Brazil)***

**ABSTRACT**

*Metal alloy production facilities and their activities may pose a risk to all surrounding areas, including the water, air and the soil quality, compromising the development of the biodiversity of the site, whenever there is no adequate infrastructures to actually receive and treat the wastes.*

*In this case study, the industrial unit is located in the São Francisco riverside, in Minas Gerais state, Brazil and over more than forty years, it has produced countless environmental problems.*

*This study aims to identify which contaminants are present in these soils, to define the contamination extent of the studied area, and determine nutrient concentrations in order of assessing the effectiveness of future reclamation projects. As so, it is also shown how this area can be restored using phytoremediation as a more cost-friendly tool to intervene in this highly polluted soils.*





## **1. Introdução**



## Introdução

O solo é um componente muito importante da biosfera, pois não é somente um sumidouro para os contaminantes, actuando ainda como um tampão natural, controlando o transporte de elementos químicos e substâncias para a atmosfera, a hidrosfera e o biota, o que faz com que a qualidade ambiental seja inteiramente dependente dos solos (Kabata-Pendias, 2001; Li *et al.*, 2009). Deste modo, a função mais importante para um solo é a sua produtividade, sendo que com o aumento da industrialização e urbanização, os solos têm aumentando o seu grau de contaminação, o que põe em perigo ecossistemas, águas (superficiais e subterrâneas), a segurança alimentar e, conseqüentemente, a saúde e sobrevivência humanas (Kabata-Pendias, 2001; Li *et al.*, 2009).

A contaminação de solos por metais pesados é tão antiga quanto a capacidade do Homem para fundir e processar minério, sendo por isso, maioritariamente associada a fontes antrópicas. A presença de elementos tóxicos nos solos deve-se a um conjunto de processos naturais, no entanto, a actividade humana (por exemplo associada a explorações mineiras, ou ao funcionamento de indústrias e ao tratamento e eliminação dos resíduos provenientes destas) provoca um excesso nas concentrações destes elementos (Bird *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2009). Embora a dinâmica e as propriedades físicas e biogeoquímicas dos mais importantes contaminantes do solo já sejam conhecidas, a persistência destes elementos no solo é muito mais elevada quando comparada com outras esferas terrestres. Deste modo, as concentrações destes elementos nos solos poderão ser diminuídas apenas por lixiviação (e passagem para a hidrosfera), por absorção pelas plantas (e passagem para a biosfera) ou erosão (Kabata-Pendias, 2001).

Assim, para determinar o risco que determinado solo apresenta, é necessária uma avaliação e determinação da concentração destes elementos nos solos, de modo a permitir o controlo e monitorização destas áreas (Sahuquillo *et al.*, 2003). No entanto, e segundo o mesmo autor, o risco depende não apenas do nível de contaminação que o solo apresenta, mas também do uso que lhe será dado após intervenção, visto que os níveis críticos variam conforme a utilização futura que terá.

Porém, a avaliação do impacte ambiental de um determinado elemento é, mais do que a determinação das concentrações totais associadas a estes elementos, o conhecimento das fracções parciais, ligadas a fases minerais específicas que a curto ou longo prazo podem alterar a sua mobilidade.

A mobilidade dos metais pesados contidos num solo depende (Sahuquillo *et al.*, 2003):

- Do tipo de solo e das suas características intrínsecas (pH, teor em carbonatos, potencial de oxidação redução – Eh, teor em matéria orgânica, capacidade de troca catiónica e textura);
- Da natureza da contaminação, em termos da sua origem e características de deposição (nomeadamente se se encontra na forma solúvel ou particulada, ou se a emissão de contaminantes foi local e momentânea ou contínua);
- Das condições ambientais que podem levar à meteorização e, conseqüentemente, à remobilização destes elementos, como são exemplos a acidificação, alterações no estado de oxidação/redução, variações na temperatura ou no regime pluviométrico.

Assim, de forma a determinar a mobilidade destes elementos e a sua dinâmica nos solos podem ser realizados ensaios analíticos com extracções químicas selectivas, que se podem classificar como simples ou sequenciais (Rauret, 1998; Sahuquillo *et al.*, 2003; Adamo *et al.*, 2006). As extracções simples são muito mais rápidas, utilizando-se apenas um único extractante e focam-se na solubilização de uma fase mineral, cujo conteúdo se relaciona com a disponibilidade desse elemento. Este tipo de extracções são muitas vezes utilizadas para estudos de fertilidade e qualidade de culturas em Ciência do Solo, de forma a determinar as fracções biodisponíveis dos principais elementos maiores e nutrientes (Rauret, 1998).

Por outro lado, extracções sequenciais oferecem informações mais detalhadas, sendo por isso também mais morosas, caracterizando-se essencialmente pela remoção de fracções cada vez mais estáveis, por variação de parâmetros físico-químicos (pH e Eh) (Rauret *et al.*, 1999).

Existem, na bibliografia, inúmeros métodos de extracção sequencial (Salomons & Förstner, 1980; Rauret, 1998; Sahuquillo *et al.*, 2003; Pueyo *et al.*, 2004; Adamo *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009; Cheng-xiu & Jie-min, 2011) que podem passar pelo método mais simples de três fases, denominado pela sigla BCR, proposto pela Comunidade Europeia (*European Community Bureau of Reference*) (Rauret *et al.*, 1999; Cappuyns *et al.*, 2007), ou o método de quatro fases de Tessier *et al.* (1979). Todos estes métodos possuem a característica comum de fraccionar sequencialmente uma parte do solo, correspondentes a diferentes fases minerais, no entanto a existência de variados métodos e versões da extracção sequencial prende-se com os objectivos principais do trabalho, do tipo de solo (ou material geológico utilizado) e até do clima na área em estudo, visto que todas estas características podem influenciar a sua mineralogia e/ou características físicas (Rauret *et al.*, 1999; Cappuyns *et al.*, 2007).

Tendo em conta a problemática cada vez maior relacionada com a contaminação do ambiente físico, nomeadamente solos, sedimentos ou águas, e devido à sua elevada persistência, é cada vez mais importante a existência de soluções. Desse modo, muitas técnicas e métodos de recuperação ambiental têm sido idealizados ao longo dos anos, maioritariamente relacionados com alterações físico-químicas dos solos (Marques *et al.*, 2009). Entre estas destacam-se (Marques *et al.*, 2009):

- A lavagem do solo, que consiste num processo que separa a fracção grosseira do solo (correspondentes às fracções areia e balastro) da fracção fina (silte e argila) por ser na fracção fina onde os contaminantes preferencialmente se encontram. A fracção fina é posteriormente tratada utilizando outros métodos;
- A extracção por vapor, que envolve a instalação de poços na área contaminada, onde se aplica uma pressão de vácuo, o que leva à volatilização dos constituintes da fase contaminada, que são extraídos em poços de extracção;
- O flushing do solo, que leva à eliminação dos contaminantes por passagem de um fluido extractante pelos solos, que lixivia estes elementos. Este fluido é posteriormente recuperado e tratado;
- A solidificação do solo que leva ao enclausuramento do material contaminado num sólido de elevada estabilidade;
- A estabilização / imobilização que reduz o risco por conversão do material contaminado em fracções menos solúveis e móveis;
- A vitrificação que corresponde à utilização de uma fonte elevada de energia de modo a fundir o solo a temperaturas extremamente elevadas, formando compostos inorgânicos quimicamente inertes ou decompondo compostos orgânicos através de pirólise;
- A electrocinese que remove contaminantes dos solos por aplicação de um campo eléctrico;
- A desadsorção térmica que consiste na escavação do solo e posterior aquecimento a elevadas temperaturas, de forma a que os contaminantes sejam removidos do solo. Estes elementos, em forma de vapor, são recolhidos e tratados de outras formas;
- O encapsulamento que corresponde ao isolamento e contenção físicos do material contaminado, através da colocação de capas de impermeabilização de forma a limitar a infiltração por precipitação;
- A injeção de nanopartículas, entre as quais as nanopartículas de ferro zero valente, que possuem uma elevada capacidade redutora dos contaminantes de solos e águas. A sua elevada reactividade associa-se às suas pequenas dimensões tornando esta técnica passível de remediar áreas contaminadas com compostos orgânicos, aniões inorgânicos (dicromatos,

arsenatos, percloratos e nitratos), metais dissolvidos (zinco, cádmio, níquel, urânio e crómio) e pesticidas (Zhang, 2003; Li *et al.*, 2006; U.S.EPA, 2008; Müller & Nowack, 2010).

Uma outra opção será a utilização de fitorremediação. A fitorremediação é uma técnica já amplamente utilizada e estudada de modo a diminuir concentrações de metais pesados em solos por todo o Mundo. É uma técnica de remediação biológica, *in-situ*, limpa, que utiliza plantas de forma a remover contaminantes de águas, sedimentos ou solos. Esta remoção pode ser feita de quatro formas (Pivetz, 2001):

- Por degradação dos contaminantes, maioritariamente utilizado para poluentes orgânicos (por rizodegradação ou fitodegradação);
- Por acumulação, através da contenção e remoção de contaminantes orgânicos ou metálicos (por fitoextração ou rizofiltração);
- Por dissipação, por remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos e emissão para a atmosfera (através da fitovolatilização);
- Por imobilização, através da contenção, numa área específica, de poluentes orgânicos e inorgânicos (através de controlo hidráulico ou fitoestabilização).

Assim, e segundo Pivetz (2001) e Marques *et al.* (2009), é possível ainda definir, estando estes processos ilustrados na Figura 1.1:

- O processo de rizodegradação, como o aumento da capacidade de biodegradação abaixo da zona radicular por acção de microorganismos;
- A fitodegradação consiste na captação pelo sistema radicular seguida de acumulação, e utilização no metabolismo da planta, de elementos contaminantes.
- A fitoextração resume-se à acumulação no interior da planta (normalmente na parte aérea) de contaminantes para posterior remoção;
- A rizofiltração consiste na adsorção pelo sistema radicular e contenção e/ou posterior remoção destes elementos;
- A fitovolatilização consiste na captação dos elementos contaminantes e volatilização na parte aérea;
- A fitoestabilização consiste na imobilização de contaminantes no solo, por redução da sua mobilidade ou biodisponibilidade.

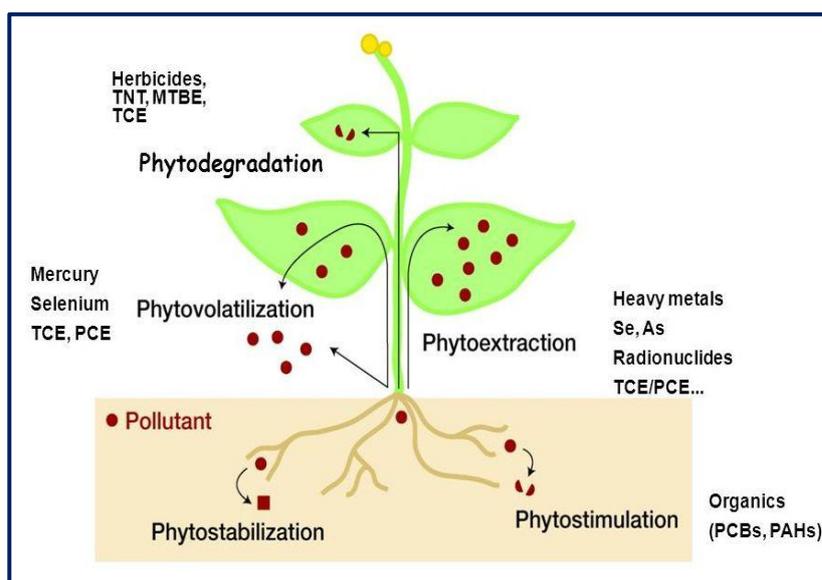


Figura 1.1: Técnicas de fitorremediação.  
Adaptado de Pilon-Smits (2005).

As vantagens e limitações da utilização de métodos de fitorremediação em áreas contaminadas com metais pesados têm sido largamente estudadas. De uma forma geral, a implementação de técnicas de descontaminação utilizando processos físico-químicos são muito mais dispendiosas, o que favorece a aplicação de métodos de fitorremediação (Lasat, 2000). No entanto, a aplicação destes métodos acarreta ainda algumas limitações, nomeadamente relacionadas com o seu pequeno raio de acção (o que torna imperativo um grande número de espécies vegetais para a descontaminação de uma área), a impossibilidade de descontaminação de zonas abaixo do nível radicular, a impossibilidade de remoção de contaminantes não bioacessíveis e a remoção dos resíduos orgânicos após a colheita (Lasat, 2000).

O presente trabalho compreende assim a implementação destas metodologias de forma a caracterizar solos em ambiente tropical, no estado brasileiro de Minas Gerais e determinar tipos de remediação que poderão ser aplicados na área, verificando a possibilidade de implementação de fitorremediação. A área em estudo situa-se na área industrial da Votorantim Metais S.A., situada a cerca de três quilómetros da cidade de Três Marias.

A Votorantim Metais S.A. é uma das cinco maiores empresas a nível mundial no processamento de ligas metálicas e a única empresa no Brasil que produz zinco elementar, sendo a sua unidade industrial em Três Marias uma das maiores em termos de tratamento de zinco (de Abreu & Martins, 2009; Votorantim Metais). Historicamente, a unidade de Três Marias, da inicialmente denominada Companhia Mineira de Metais (CMM), foi constituída em 1956 com o objectivo de industrializar o minério silicatado da mina de Vazante (Figura 1.2), Minas Gerais (Golder Associates, 2007a; dos Santos, 2010). Em 1959, teve início a implantação da indústria em Três Marias, junto às margens do rio São Francisco, próximo à estrutura hidroeléctrica com o mesmo nome. A localização da unidade de Três Marias da Votorantim Metais foi determinada pela proximidade a recursos básicos – água e energia eléctrica – indispensáveis ao processo electrolítico para obtenção do zinco metálico (Golder Associates, 2007a). Operacional desde 1969, apenas um ano após o início do seu funcionamento, a Votorantim Metais produzia 10 mil toneladas/ano de zinco metálico em lingotes. Em Setembro de 1972, a produção aumentou para 25 mil t/ano. Numa terceira etapa de expansão (1978), a empresa passou a produzir zinco electrolítico do tipo *High Grade*, com 99,9% de pureza, elevando a produção, gradualmente, para 70 mil t/ano até 1990. Na década de 90, a produção continuou a aumentar, mas apenas a partir de 2002, com a implantação de um processo de transformação metalúrgica do zinco no sistema misto, passando a englobar, quer minério silicatado proveniente da mina de Vazante, quer minério sulfuretado proveniente da mina de Morro Agudo (próxima à cidade de Paracatu, Minas Gerais) (Figura 1.2), a produção chegou a 180 mil t/ano, correspondendo à produção actual (Golder Associates, 2007a; de Abreu & Martins, 2009; dos Santos, 2010; Votorantim Metais).

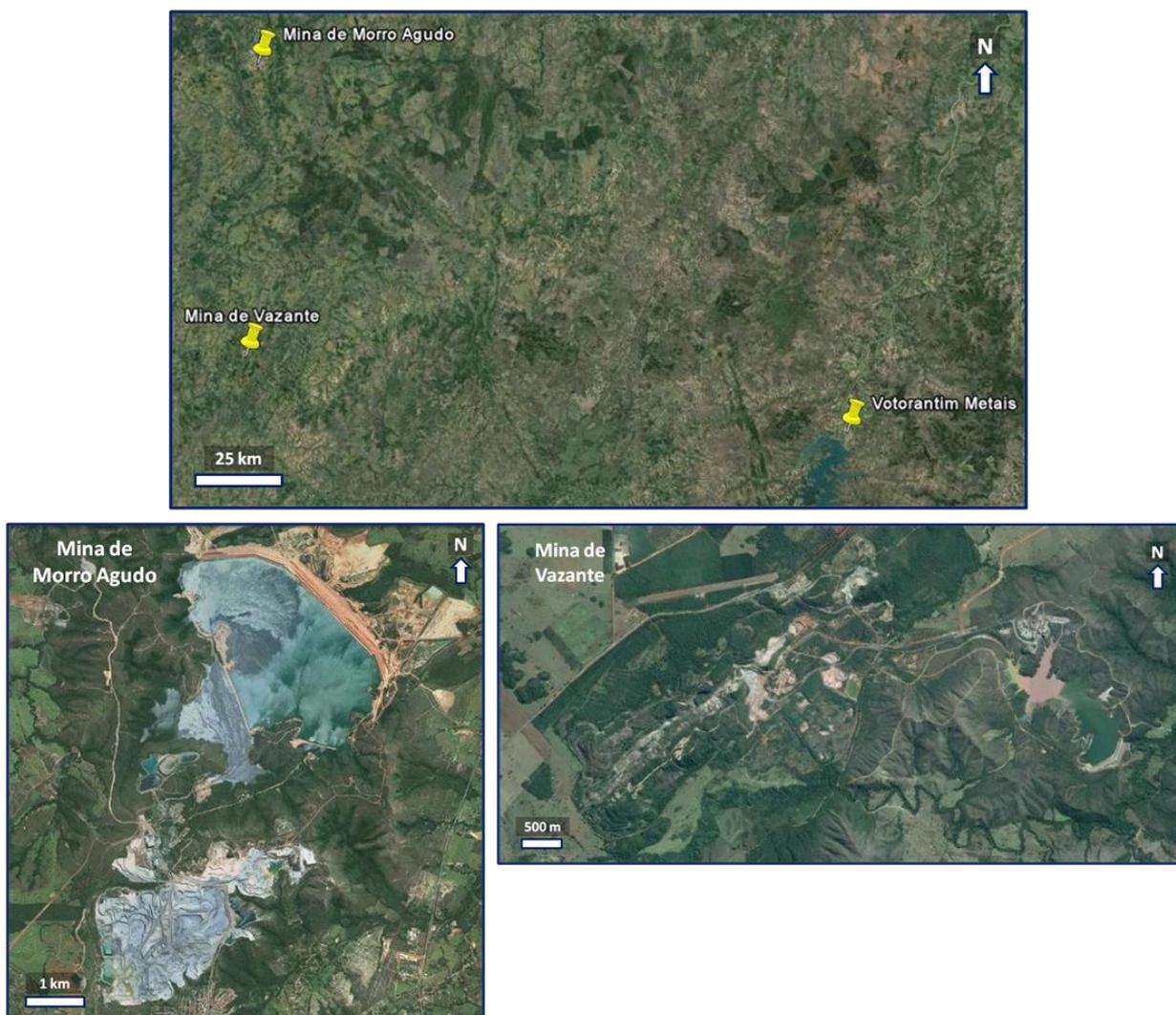
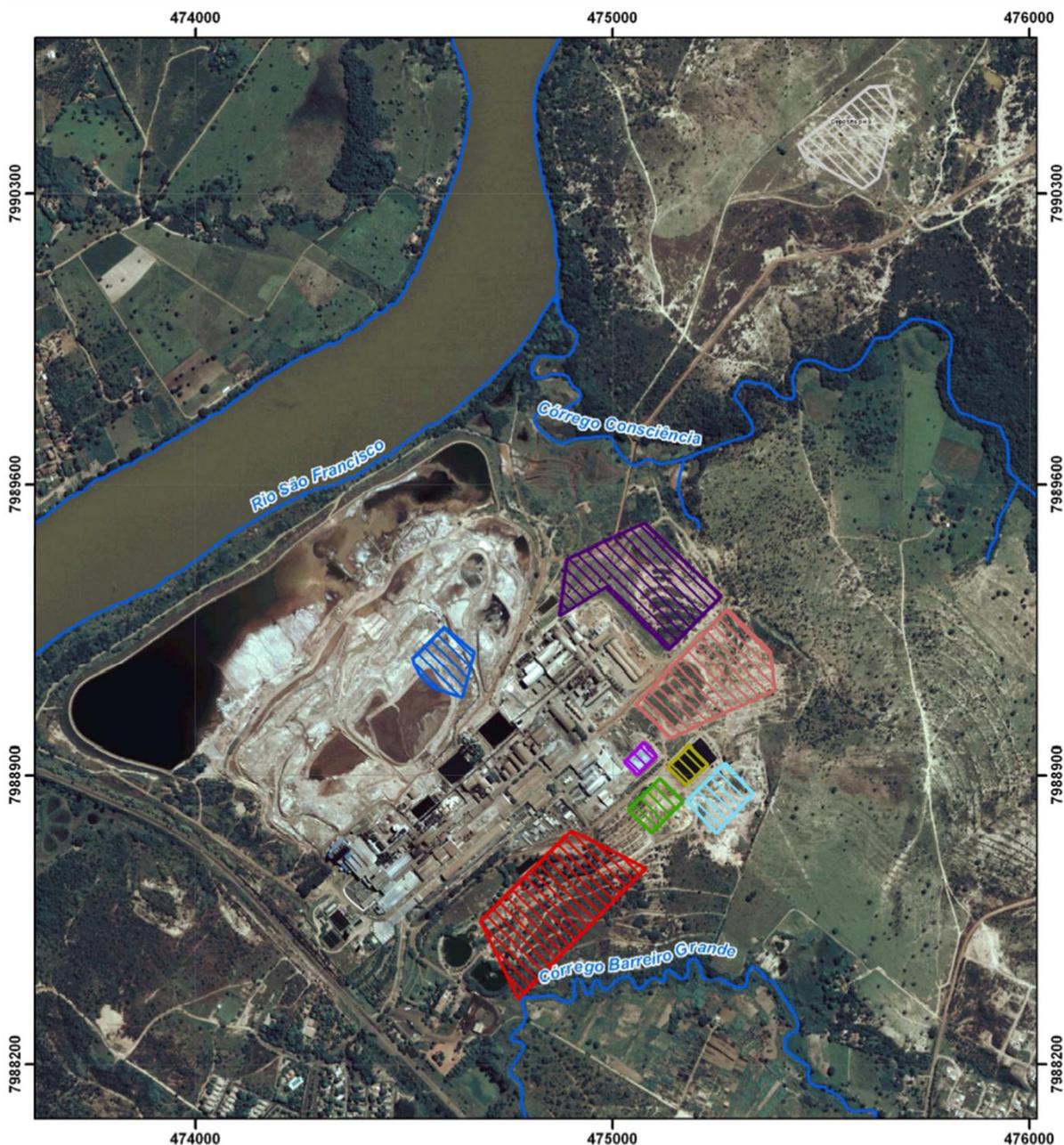


Figura 1.2: Localização das principais minas cujo minério é processado na unidade industrial de Três Marias.

Durante vários anos, a empresa depositou em áreas específicas da unidade industrial de Três Marias, resíduos do seu funcionamento, originando depósitos locais de sucatas, entulho de obras, tambores de óleos, restos de EPIs (Equipamentos de Protecção Individual), resíduos resultantes da purificação do minério ricos em zinco, cádmio, cobalto e cobre ou efluentes resultantes do processo de tratamento. Embora muitos destes resíduos tenham sido removidos de grande parte destas áreas durante a década de 90 (Figura 1.3), restam ainda vestígios nestes locais (Golder Associates, 2007b).



**LEGENDA**

-  ÁREA 1: antigo depósito de escória de zinco (resíduos retirados)
-  ÁREA 2: antigo depósito de resíduos de Cu/Co/Cd da purificação de zinco (resíduos retirados)
-  ÁREA 3: depósito de resíduos de Cu/ Co/ Cd da purificação de zinco (pátio 4, em operação)
-  ÁREA 4: depósito envelopado de resíduos de Cu/ Co / Cd da purificação de Zinco
-  ÁREA 5: antigo depósito de escória de zinco (resíduos retirados)
-  ÁREA 6: antigo depósito de enxofre (resíduos retirados)
-  ÁREA 7: depósito de resíduos da 2ª fase do tratamento residual (pH 9)
-  ÁREA 8: antigo depósito de resíduos de Cu/Co/Cd da purificação de zinco (resíduos retirados)
-  ÁREA9: antigo depósito de resíduos da 2ª fase do tratamento residual - pH 9 (resíduos retirados)

**NOTAS**

Imagem de Satélite QuickBird  
 Tomada em 06/04/2006  
 Composição RGB-321  
 (Cores Verdadeiras)  
 Resolução espacial 0,6 metro

**1:12.500**



Projeção Universal Transversa de Mercator  
 Fuso 23 HS - Datum SAD69



**Figura 1.3: Localização dos antigos aterros de resíduos, construídos anteriormente à Barragem Velha. Adaptado de Golder Associates (2007a).**

Deste modo, e devido à grande quantidade de resíduos gerados durante a primeira década de funcionamento e ao elevado número de depósitos criados ao longo destes anos, foi criada, em 1983, a primeira estrutura de contenção de resíduos, a Barragem Velha, localizada na margem direita do rio São Francisco (Figura 1.4), que se manteve operacional até 2002 (Oliveira & Horn, 2006; Oliveira, 2007). Ao longo dos anos verificaram-se episódios de poluição nos solos da envolvente e nas águas do próprio rio São Francisco, essencialmente associados a episódios de alta mortalidade de fauna piscícola (Oliveira, 2007; Conflitos Ambientais Minas Gerais), o que levou ao encerramento da Barragem Velha e posterior construção de um Dique de Segurança a jusante do aterro, de modo a reter a drenagem pluvial e os sólidos carreados, tendo sido construída a Barragem da Lavagem (ou Barragem Nova) em 2001 (Figura 1.4) (Oliveira & Horn, 2006; Oliveira, 2007). A construção da Barragem da Lavagem, a cerca de seis quilómetros da unidade, fez com que na sua área envolvente a empresa não realizasse a eliminação dos seus resíduos directamente sobre coberturas superficiais, estando então conforme as directivas da agência ambiental do Estado de Minas Gerais (Oliveira, 2007). No entanto, também esta Barragem se mostrou ineficiente na contenção da grande quantidade de resíduos resultantes do funcionamento da unidade, verificando-se episódios de contaminação na envolvente associados à percolação de águas de escorrência contaminadas (Conflitos Ambientais Minas Gerais), o que levou à construção do Depósito Murici (Figura 1.4). Localizado proximamente à Barragem da Lavagem, o Depósito Murici consiste numa barragem de resíduos perigosos, numa estrutura com múltiplas bacias de deposição, devidamente impermeabilizadas, de forma a impedir o alastramento das águas de escorrência para a área envolvente, prevenindo assim a contaminação das águas (superficiais ou subterrâneas) e dos solos (Batista *et al.*, 2008). Devido aos episódios de contaminação identificados nas áreas envolventes quer à unidade de Três Marias, quer às barragens de resíduos já desactivadas, a agência ambiental do Estado de Minas Gerais (FEAM) responsabilizou a Votorantim Metais S.A. pela limpeza dos resíduos aqui depositados, assim como a recuperação ambiental destes locais (Batista *et al.*, 2008).



Figura 1.4: Localização dos depósitos de resíduos da unidade de Três Marias da Votorantim Metais S.A..

É, portanto, neste processo de remediação que este trabalho se insere, focando-se essencialmente na recuperação dos solos identificados nas imediações da unidade industrial de Três Marias. Pretende-se assim compreender quais os elementos contaminantes nestes solos, determinar a sua mobilidade, extensão e profundidade contaminada e discutir qual a melhor técnica de recuperação desta área, investigando assim a possibilidade de implementação de fitorremediação.

Assim, este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos:

- O primeiro capítulo corresponde a uma introdução, em que se pretende realizar uma abordagem mais teórica ao trabalho realizado, complementada pelo historial de contaminação local e pelos objectivos do presente trabalho;
- O segundo capítulo, por sua vez, corresponde ao enquadramento da área em estudo, dos pontos de vista geográfico, climático e geológico, de forma a mais facilmente ser possível integrar os dados obtidos;

- O terceiro capítulo indica as metodologias técnicas realizadas para a amostragem, processamento e análise dos solos estudados;
- O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, sendo a relação e discussão dos vários resultados realizados no capítulo quinto;
- O quinto capítulo corresponde à discussão e relação entre os vários parâmetros analisados, tendo-se procedido à comparação dos valores obtidos com os valores óptimos para a implementação de espécies vegetais na área e, portanto, discutindo a possibilidade da realização de fitorremediação da área;
- O sexto capítulo corresponde à discussão de possibilidades de remediação da área, com especial foco na fitorremediação, procurando-se identificar as melhores espécies vegetais para a recuperação da área em estudo;
- O capítulo sétimo corresponde às conclusões, obtidas por análise e discussão dos resultados e respectivo significado tendo em conta as características físico-químicas do local e no contexto da sua problemática ambiental.





## **2. Enquadramento da Área em Estudo**



## Enquadramento

### 2.1. Enquadramento Geográfico

A unidade de Três Marias da Votorantim Metais S.A., de coordenadas  $18^{\circ} 11'19.16''S$ ,  $45^{\circ} 14' 24.31''W$ , localiza-se no município de Três Marias, no Estado de Minas Gerais, Brasil. Situada junto à margem do rio São Francisco, a área em estudo representa uma área aproximada de  $3 \text{ km}^2$ , a uma altitude de 563 m, distando cerca de três quilômetros da cidade de Três Marias e aproximadamente quatro quilômetros da barragem com o mesmo nome. É limitada a Norte pelo córrego Consciência, a Sul pelo córrego Barreiro Grande, ambos afluentes do rio São Francisco, a Oeste pelo rio São Francisco e a Este pela cidade de Três Marias (Figura 2.1).

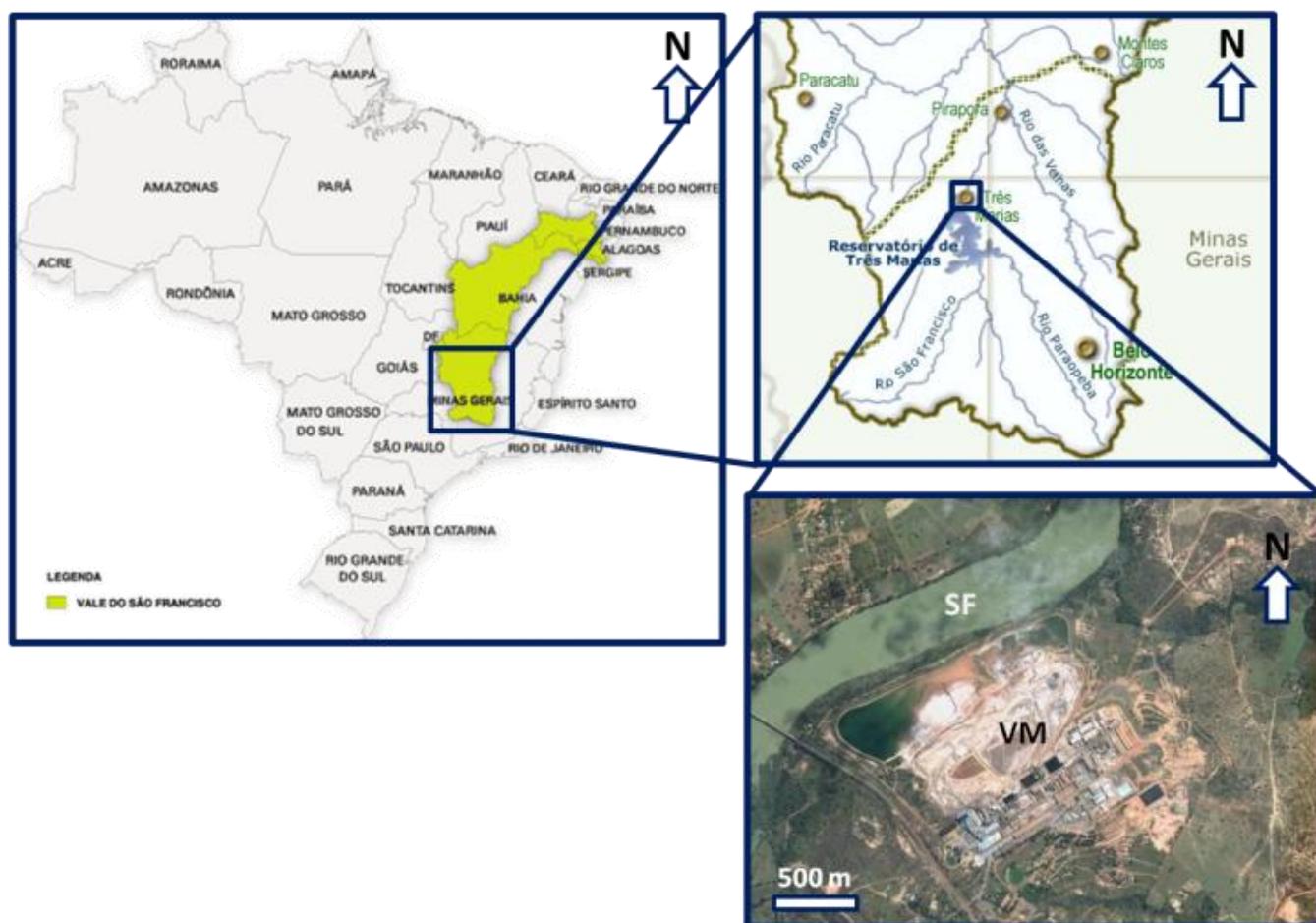


Figura 2.1: Localização da área em estudo.  
SF – rio São Francisco; VM – Votorantim Metais.

O rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, no Estado de Minas Gerais. Possui uma extensão de cerca de 2800 km, ocupa uma área de 638323 km<sup>2</sup> (o que corresponde a cerca 8% do território brasileiro), abrangendo 503 municípios e 7 unidades de federação: Bahia (307794 km<sup>2</sup>, 48,2%), Minas Gerais (235635 km<sup>2</sup>, 36,9%), Pernambuco (68966 km<sup>2</sup>, 10,8%), Alagoas (14687 km<sup>2</sup>, 2,3%), Sergipe (7024 km<sup>2</sup>, 1,1%) e Goiás (3193 km<sup>2</sup>, 0,5%), desaguando no Oceano Atlântico. É um dos rios mais importantes no Brasil, devido à sua grande extensão e à sua grande importância económica, especialmente relacionada com a pesca, a irrigação e, em algumas zonas, a navegação (Marinho *et al.*, 2006).

Devido à sua grande extensão, o rio São Francisco é muitas vezes dividido em quatro áreas importantes (Marinho *et al.*, 2006; Mozeto *et al.*, 2007), ilustradas na Figura 2.2:

- Alto São Francisco, que corresponde ao trecho entre a nascente até a cidade de Pirapora (no Estado de Minas Gerais), onde se insere a área em estudo;
- Médio São Francisco, entre Pirapora e Remanso (Estado de Bahia);
- Sub-Médio São Francisco, entre Remanso até Paulo Afonso (ambas as cidades no Estado da Bahia);
- Baixo São Francisco, desde a cidade de Paulo Afonso até à sua foz (entre os Estados de Sergipe e Alagoas).

Os principais afluentes do rio São Francisco encontram-se no Estado de Minas Gerais, fornecendo cerca de 70% da água do rio, num percurso aproximado de 700 km, com área de drenagem de 243000 km<sup>2</sup>, que corresponde a cerca de 40% da área do Estado, tornando este trecho o mais importante do rio São Francisco (CODEVASF, 2003 *in* Mozeto *et al.*, 2007).

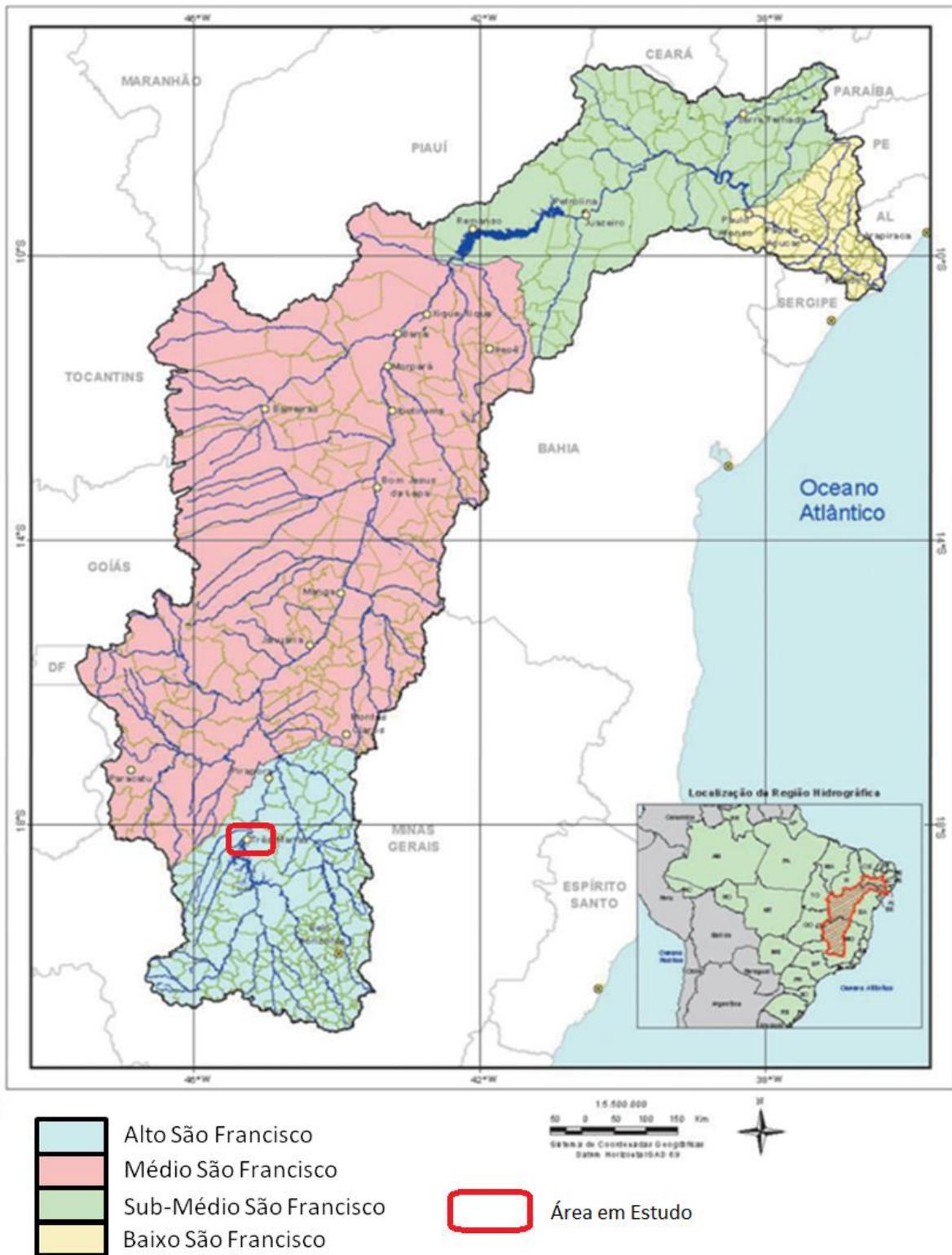


Figura 2.2: Principais sub-bacias do rio São Francisco.  
Adaptado de Marinho *et al.*, 2006.

O rio São Francisco, devido à sua elevada importância, encontra-se amplamente estudado e monitorizado. Deste modo, para compreender o seu enquadramento e o seu historial em termos geológicos, apresentam-se, na Tabela 2.1, as principais características morfo-geológicas da região do Alto São Francisco.

Tabela 2.1: Principais características da região do Alto São Francisco.  
De Marinho *et al.* (2006).

Região do Alto São Francisco	
Área (km <sup>2</sup> )	100076
Altitudes (m)	1600 a 600
Geologia	Rochas mais antigas do Pré-Câmbrico e pelas rochas do Grupo Bambuí
Principais acidentes topográficos	Serras da Canastra e Espinhaço
Solos	Latossolos, argilossolo vermelho, alissolo crômico, cambissolo háplico, areias quartzosas e litossolos
Vegetação predominante	Cerrado e fragmentos de florestas

Os mesmos autores referem ainda as principais fontes de poluição nesta região até à cidade de Três Marias, onde se encontra a área em estudo, nomeadamente relacionadas com as actividades agrícolas, de pecuária e suinicultura, o lançamento de esgotos domésticos sem tratamento adequado, extracção de calcário e minérios de manganês e actividades industriais (alimentícias e metalúrgicas).

## 2.2. Enquadramento Geológico

Do ponto de vista geotectónico, a área em estudo encontra-se inserida na zona Sul do Cratão de São Francisco, definido por Almeida (1977) *in* Trindade (2010) como uma das porções da plataforma Sul-Americana individualizada em decorrência dos processos orogenéticos do Evento Brasileiro ( $\pm$  600 Ma). Estes eventos originaram, a Leste, a Faixa Araçuaí e a Oeste, a Faixa de Dobramento Brasília durante o Neoproterozóico (Trindade, 2010). Assim, a Faixa de Dobramento Brasília corresponde a uma cadeia de dobramentos e cavalgamentos de antepaís que atinge uma largura máxima de cerca de 200 km na parte Sul da bacia (Alkmin & Martins-Neto, 2001 *in* Trindade, 2010).

Deste modo, o Cratão de São Francisco encontra-se envolvido por faixas neoproterozóicas: as Faixas de Dobramento Brasília e Rio Preto a Oeste, e a Faixa Araçuaí a Leste (Figura 2.3). Neste contexto, Alkmin *et al.* (1993, 1996) *in* Trindade (2010) propõe uma compartimentação baseada

nos elementos neoproterozóicos, distinguindo assim um Compartimento Oeste, correspondente às Faixas Brasília e Rio Preto, um Compartimento Este, representado pela Faixa Araçuaí e um Compartimento Central, onde se localizam as unidades Pré-Câmbricas com baixa deformação, onde se insere a área em estudo.

O relevo da região em estudo é caracterizado por superfícies planas e áreas dissecadas, resultantes predominantemente da alternância de actuação de processos morfoclimáticos associados ao condicionamento geológico (Oliveira, 2007). Deste modo, a área de estudo encontra-se inserida na Depressão São Franciscana, que, segundo Euclides & Ferreira (2001) *in* Oliveira (2007), engloba toda área do rio São Francisco e o médio curso dos rios Pará e Paraopeba. As formas aplanadas e superfícies onduladas, decorrentes do processo de erosão areolar, intercalam-se com as formas fluviais de dissecção, variando as altitudes entre 600 e 800 metros.

A leste de Três Marias, o relevo já é classificado como Planalto do São Francisco, formado por superfícies tabulares, com coberturas sedimentares predominantemente arenosas, recobertas por vegetação do tipo Cerrado e entrecortadas por cabeceiras de drenagem pouco aprofundadas, as denominadas veredas. Nestas áreas, as altitudes variam entre os 600 e os 1000 metros (Oliveira, 2007).

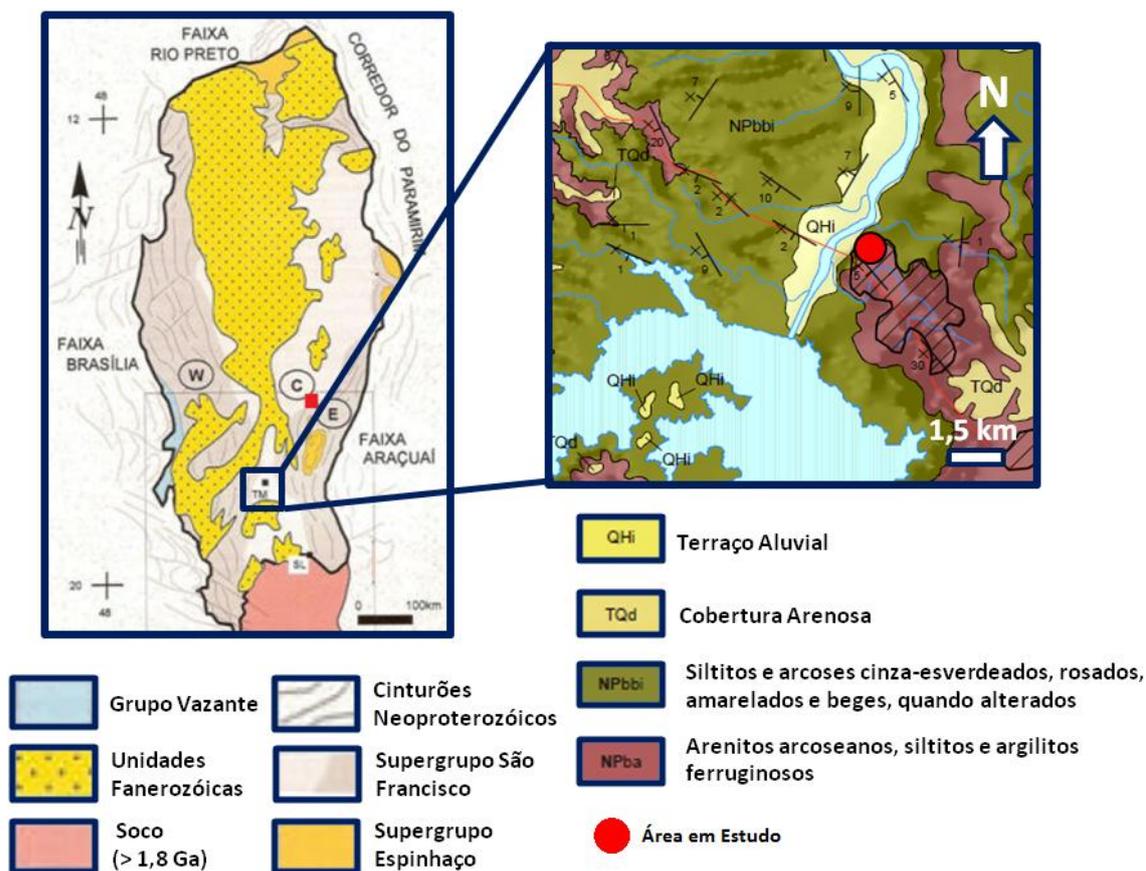


Figura 2.3: Localização da área em estudo no cratão de São Francisco e na carta geológica. Adaptado de Signorelli *et al.* (2003).

Do ponto de vista geológico, a área em estudo encontra-se inserida na Formação de Três Marias. A Formação de Três Marias, inserida no Grupo Bambuí, constitui uma espessa sequência tempestítica com relativa persistência lateral, sendo representada por arenitos arcoseanos de granulometria fina a muito fina, intercalados por siltitos arcoseanos cinza-esverdeados e violáceos com idade aproximada de 600 a 650 Ma (Signorelli *et al.*, 2003; Chiavegatto, 1992 *in* Trindade, 2010; Costa *et al.*, 2011). Em termos mineralógicos, a formação de Três Marias é constituída essencialmente por quartzo e feldspato angulosos e minerais pesados como óxidos de ferro, turmalina, zircão, epidoto e granada (Signorelli *et al.*, 2003; Costa *et al.*, 2011).

Os aspectos deposicionais da Formação de Três Marias são marcados principalmente pelo carácter discordante erosivo, apresentado ainda ausência de deformações significativas, facto que atesta a relativa estabilidade tectónica do Compartimento Central durante a deposição. A sedimentação da Formação de Três Marias regista um ambiente deposicional característico de uma plataforma continental de baixa profundidade dominada por tempestades e sujeita a uma ciclicidade de eventos deposicionais, em que cada ciclo descreve períodos de alternância no acarreo sedimentar durante períodos calmos e tempestuosos (Campos & Dardenne, 1994; Bizzi *et al.*, 2003; Chivagatto, 1992 *in* Trindade, 2010). Os depósitos pelíticos e areníticos da Formação de Três Marias indicam que o paleoambiente, marcado por alternâncias deposicionais, favoreceu a intercalação de sedimentos finos a muito finos (areia fina e silte, respectivamente) e condicionou a baixa condutividade hidráulica dos arenitos arcoseanos, favorecendo o alto grau de compactação adquirido (Trindade, 2010).

### 2.3. Enquadramento Climático

Segundo a classificação climática de Köpen, podem ser nomeadas três tipologias climáticas no Cratão de São Francisco (Figura 2.4) (Patrus *et al.*, 2001 *in* Trindade, 2010):

- *Cwb* – Clima temperado brando, com Verão ameno e chuvoso e Inverno brando. É definido pela temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e a do mês mais frio inferior 18°C, como por um Inverno seco e um Verão chuvoso;
- *Cwa* – Clima temperado brando com Verão quente e chuvoso e Inverno brando, apresentando temperaturas médias do mês mais quente superiores a 22°C e a média do mês mais frio inferior 18°C. A estação seca ocorre no Inverno e o mês mais seco tem precipitação inferior à décima parte do mês mais chuvoso;

- Aw – Tropical chuvoso, quente e húmido, com Inverno seco e Verão chuvoso. É caracterizado pela temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C.

Na área em estudo identifica-se um clima referente à tipologia Aw. Verificam-se temperaturas médias anuais que variam entre 21° e 24°C, precipitação média anual entre 1000 e 1500 mm e humidades relativas que variam entre 75 e 80% no Verão e 50 e 60% no Inverno (Carvalho *et al.*, 2005; Marinho *et al.*, 2006; Oliveira & Horn, 2006; Silva *et al.*, 2009; Amaral, 2013).

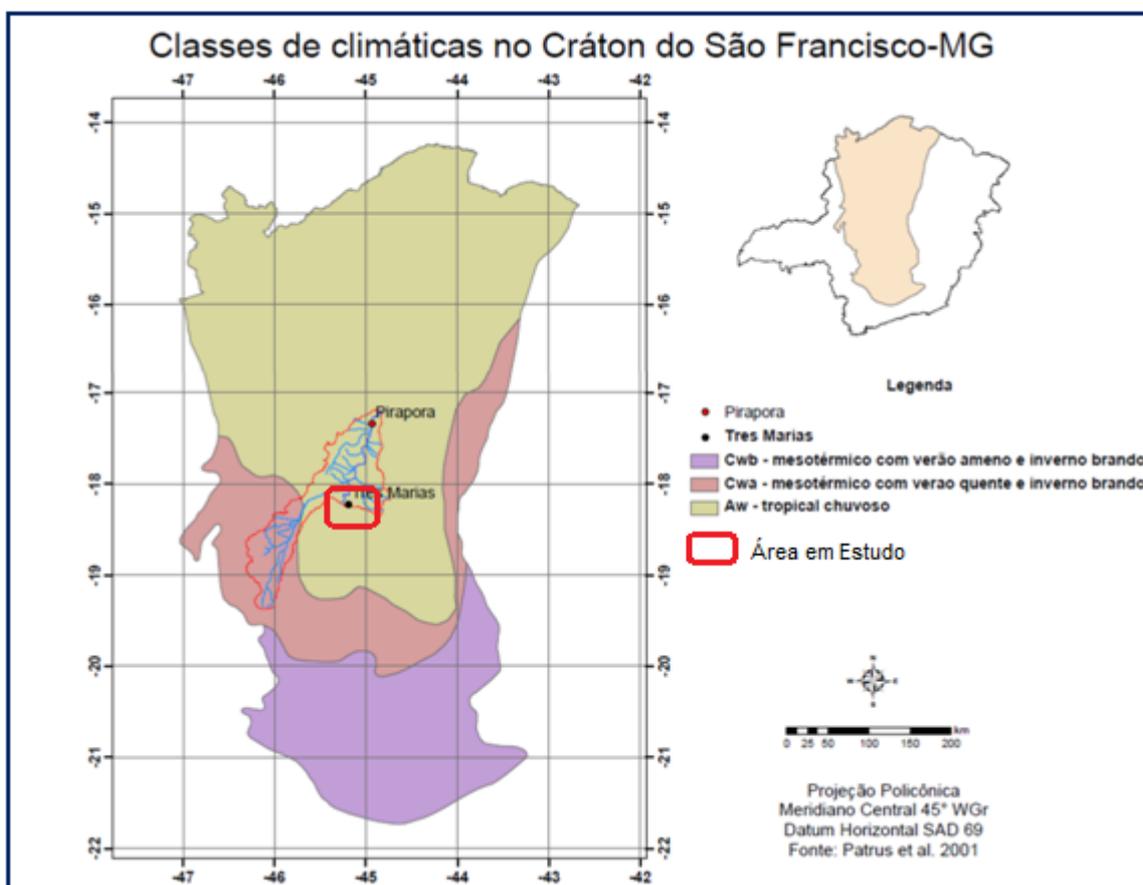


Figura 2.4: Classes climáticas no cratão de São Francisco.  
Adaptado de Trindade (2010).

## 2.4. Solo e Vegetação

De acordo com Lana (2011), na área em estudo, os tipos de solos predominantes são Latossolos e solos Podzólicos, embora também se verifiquem Areias Quartzosas, Cambissolos e Litossolos no sector Sul e nas áreas mais inclinadas. As formações rochosas são constituídas por arenitos, ardósias e calcários.

Os solos do tipo Latossolo são normalmente solos minerais, não-hidromórficos, profundos (normalmente superiores a 2 m), com horizontes B muito espessos (> 50 cm) e sequência de horizontes A, B e C pouco diferenciados. Apresentam colorações que podem variar entre o vermelho muito escuro a o amarelado, o que se deve ao seu empobrecimento em sílica e catiões de troca (em particular cálcio, magnésio e potássio), o que leva a um enriquecimento em óxidos de ferro e de alumínio, conferindo-lhes um aspecto maciço (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).

Associados aos Latossolos estão os solos pouco desenvolvidos e pouco espessos do tipo Neossolo Litólico, que se caracterizam por não apresentarem outros horizontes para além do A, assentando este horizonte directamente sobre o substrato rochoso. Estes solos ocorrem essencialmente onde a erosão possui uma grande expressão (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).

A vegetação nativa da região do Alto São Francisco é constituída predominantemente pelo Cerrado, que se estendia, antes das intensas actividades antrópicas, por quase toda a sub-bacia (Figura 2.5).

O Cerrado é, caracteristicamente, uma área normalmente plana, coberta por vegetação característica, apresentando fundamentalmente um estrato herbáceo dominado por gramíneas, que ocorre caracteristicamente em regiões de clima semi-húmido (Oliveira, 2007; Universidade Federal de Viçosa) (Figura 2.6).

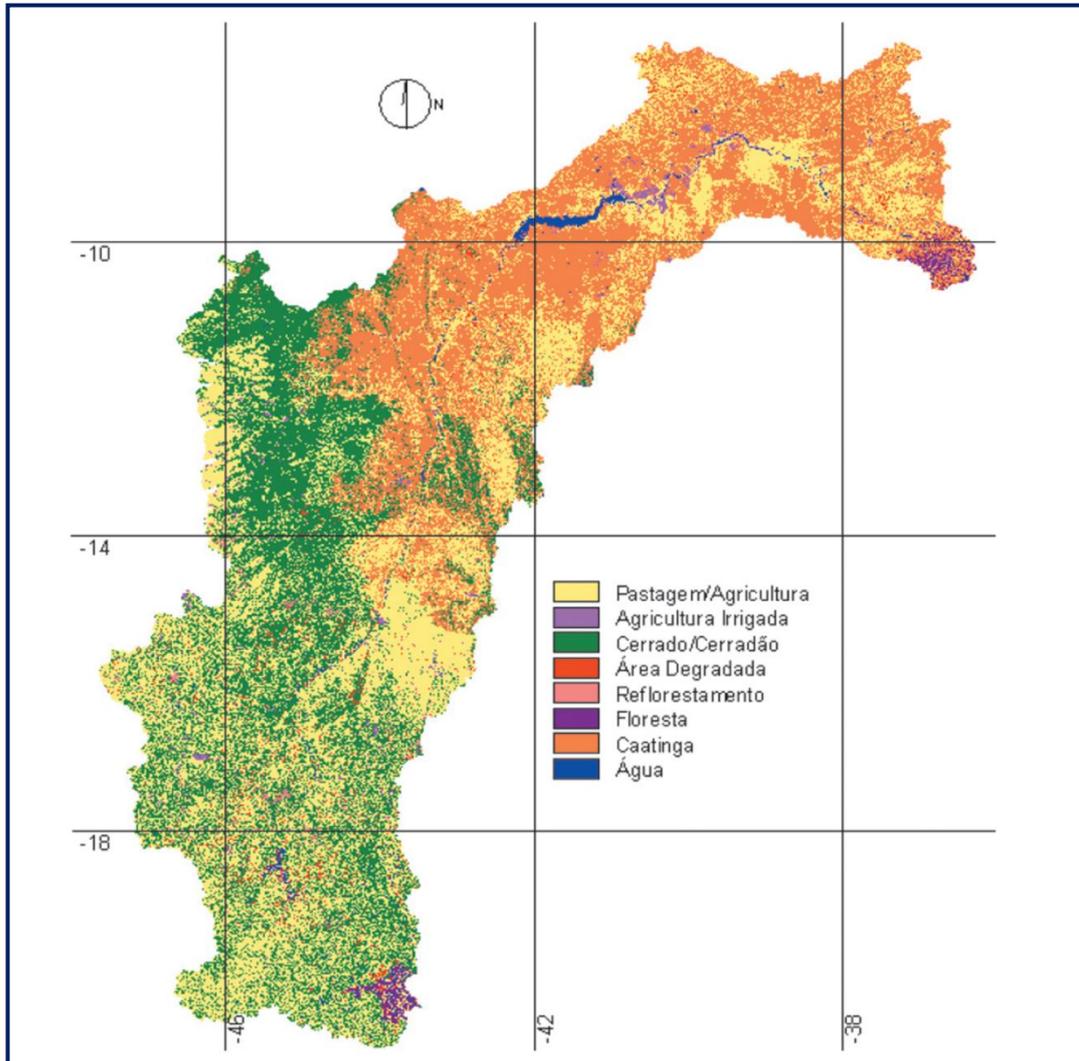


Figura 2.5: Cobertura vegetal na bacia do rio São Francisco.  
De Marinho *et al.* (2006).



Figura 2.6: Vegetação típica do Cerrado.  
De Oliveira (2007).

O Cerrado é composto por três estratos principais: o superior, arbóreo, (constituído por indivíduos com altura média entre 8 e 12 metros, podendo alcançar até 20 metros), o intermediário, arbóreo-arbustivo, (constituído por indivíduos similares ao do Cerrado, com altura entre 1 e 8 metros), e o inferior, herbáceo (constituído de gramíneas, ciperáceas e bromeliáceas). No entanto, actualmente, principalmente nas regiões mais planas, grandes áreas de Cerrado têm sido substituídas por pastagens e áreas de cultivo mecanizado, ou mesmo devastadas para a exploração de lenha e carvão, enquanto que em áreas de relevo mais acidentado, o Cerrado se encontra mais ou menos preservado (Oliveira, 2007).

As fisionomias vegetais do Cerrado são ordenadas em quatro tipos principais: campo limpo, campo sujo, cerrado *sensu stricto* e cerradão (sendo que alguns autores ainda referem o campo cerrado), cujas diferenças podem ser explicadas pela profundidade e humidade dos solos (Figura 2.7). De forma geral, os solos são profundos, bem drenados e com baixa disponibilidade de nutrientes, verificando-se elevados teores de alumínio. Embora o alumínio, mesmo em pequenas concentrações seja tóxico para muitas plantas e organismos, o mesmo não ocorre para as espécies vegetais do Cerrado, que utilizam estratégias de absorção ou exclusão sem qualquer efeito nefasto para o seu crescimento vegetativo, reprodução ou funções metabólicas, o que justifica a sua utilização em muitos estudos de fitorremediação (Santos & Novak, 2013).

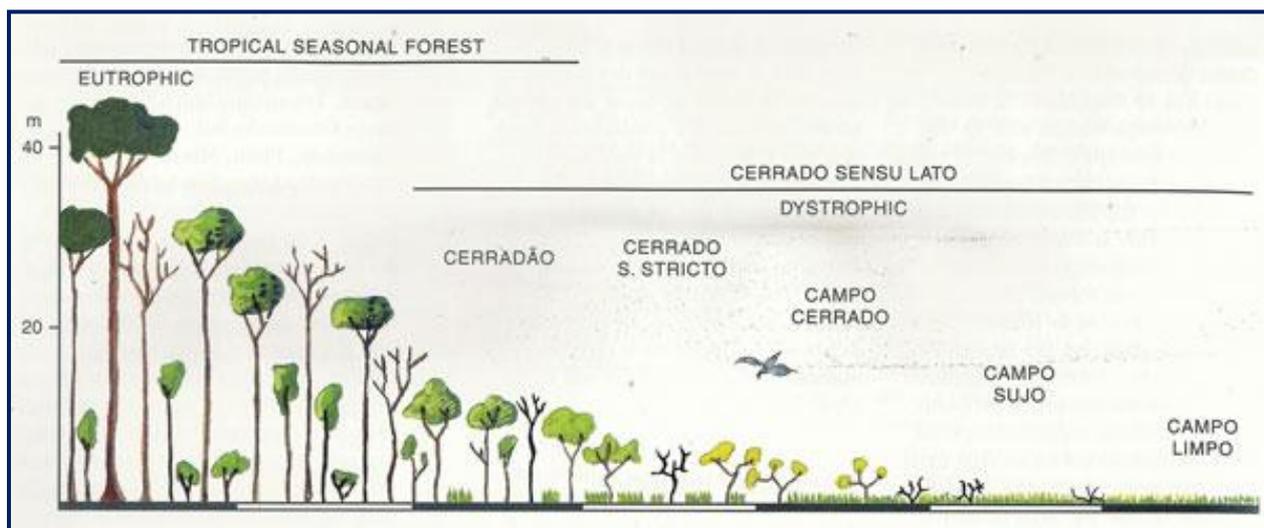


Figura 2.7: Esquemática das diferentes fisionomias do Cerrado.

De [http://ecoprofundo.files.wordpress.com/2012/08/top06\\_fig05w.jpg](http://ecoprofundo.files.wordpress.com/2012/08/top06_fig05w.jpg) (consultado a 08/09/2014).



### **3. Metodologias**



## Metodologias

### 3.1. Amostragem

O trabalho realizado na área em estudo tem como base estudos prévios realizados pela empresa de consultoria *Golder Associates*, em 2007. Este estudo delineou na área de ação da Votorantim Metais, dois tipos de áreas: áreas contaminadas e áreas degradadas (Figura 3.1), integrados em cinco áreas geográficas distintas (Figura 3.2):

- Área A1, que corresponde ao leito do córrego Consciência, com uma área de 0,98 ha;
- Área A2, que corresponde à planície aluvionar do córrego Consciência, numa área de 2,707 ha;
- Área A3, uma bacia natural de acumulação de sedimentos, que corresponde a uma parte da bacia de drenagem de um pequeno curso de água, com uma área de 0,51 ha;
- Área A4, uma bacia de contenção de sedimentos, numa zona de aterro muito degradada, com uma área de 0,15 ha;
- Área A5, uma antiga zona de deposição de resíduos, numa área de 4,79 ha.



Figura 3.1: Delimitação das áreas contaminadas (a verde) e degradadas (a vermelho) na área industrial da Votorantim Metais. Adaptado de *Golder Associates* (2007b).



Figura 3.2: Áreas delimitadas para estudos complementares de descontaminação.  
Adaptado de *Golder Associates* (2007b).

O presente trabalho compreende apenas a determinação da contaminação dos solos na envolvente da unidade de Três Marias e respectiva recuperação ambiental, portanto, e tendo em conta a natureza dos materiais, possuirá um maior número de amostras nas áreas A4 e A5, áreas onde existiam antigos aterros de resíduos (Figura 1.3) e onde não se verificam interações directas com as linhas de água locais. Foram ainda recolhidas amostras fora da área de actuação da Votorantim Metais, que serão utilizadas como um *background* geoquímico da área e se encontram representadas pela área A0 (Figura 3.2).

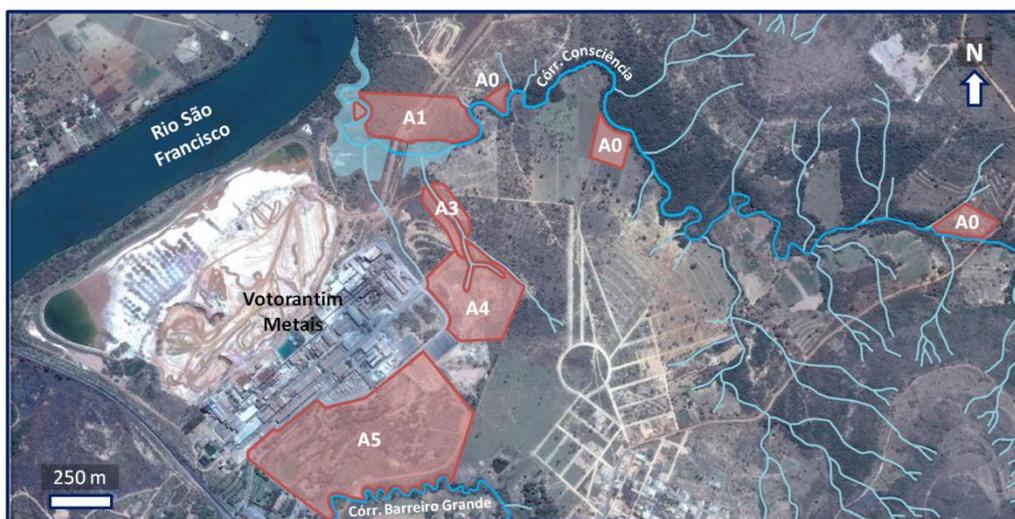
Nestas áreas foram escolhidos vários pontos de amostragem representativos, marcados e georreferenciados, segundo um sistema de amostragem rectangular, com espaçamentos entre 50 e 100 m, correspondendo sempre que possível a zonas de topografia variável de forma a serem amostrados, em cada área, solos de diversas classes e profundidades.

As amostragens foram realizadas com trado (Figura 3.3), para extracção de coluna de solo e divisão em várias camadas segundo as suas características macroscópicas. Em cada local de amostragem foram retiradas três amostras a diferentes profundidades, de forma a se obter uma amostra o mais representativa possível de cada local sendo, por isso, cada ponto de amostragem representado por três amostras: a primeira entre os 0 e os 20 cm de profundidade, a segunda entre os 20 e os 40 cm e a terceira entre os 40 e os 60 cm de profundidade. Em cada uma destas amostras foram analisados, *in situ*, os valores de pH (sempre que o solo apresentava elevado teor em água) e Eh com eléctrodos específicos, tendo sido posteriormente refrigeradas todas as amostras até à sua análise em laboratório.



Figura 3.3: Amostragem de solos na área em estudo com trado.

Foram realizadas três campanhas de amostragem, em Setembro e Novembro de 2013 e Março de 2014, durante as quais foram recolhidas 60 amostras de solo em 22 pontos, nas áreas A0, A1, A3, A4 e A5, ilustrados nas Figuras 3.4 e 3.5. O aspecto geral das áreas encontra-se representado na Figura 3.6, enquanto que a designação das amostras, assim como a respectiva localização, profundidade e descrição se encontram em Anexo, na Tabela A.1.



Planície Aluvionar — Linha de Água Principal — Linha de Água Secundária — Zona de Aterro

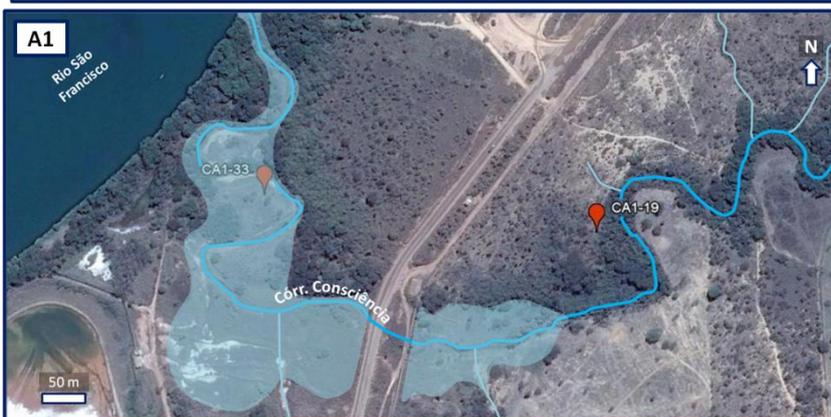
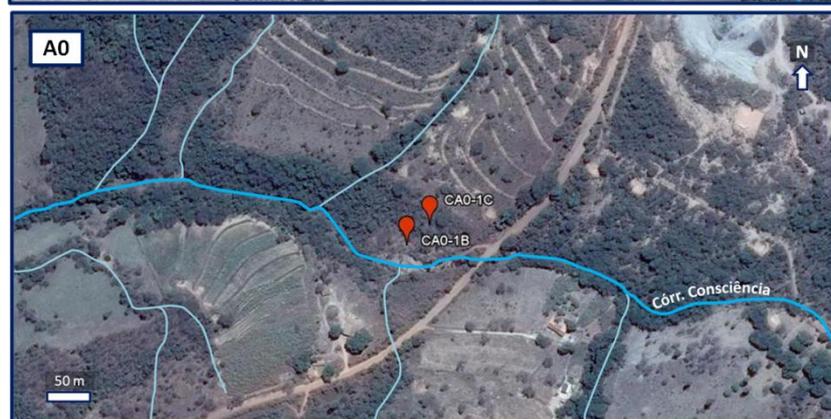


Figura 3.4: Localização das amostras de solos recolhidas nas áreas A0 e A1.

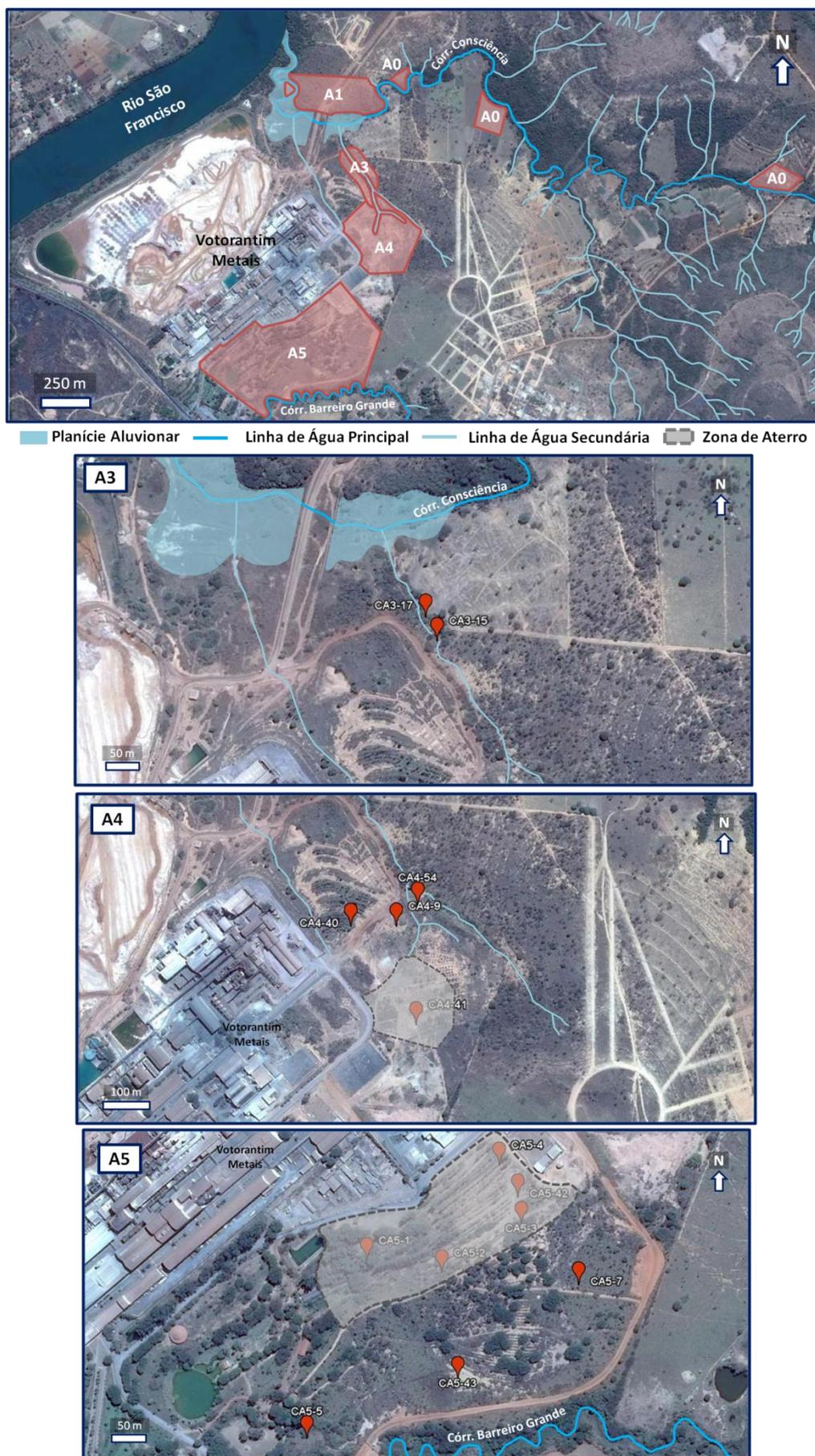


Figura 3.5: Localização das amostras de solos recolhidas nas áreas A3, A4 e A5



Figura 3.6: Aspecto geral dos solos da área em estudo.  
Adaptado de *Golder Associates* (2007b).

### 3.2. Análises Laboratoriais

As análises laboratoriais realizadas tiveram como objectivo primário a avaliação do grau de contaminação dos solos da área em estudo, tendo por isso sido determinados alguns parâmetros físico-químicos e realizadas digestões parciais, extracções sequenciais e ensaios de lixiviação, de forma a identificar os principais elementos metálicos associados às diferentes fases minerais, determinando assim a sua perigosidade ambiental. Este estudo foi acompanhado pela caracterização física do material. Com o intuito de determinar o grau de fertilidade dos solos, tendo em vista a possibilidade de implementação da fitorremediação para a remediação desta área, realizaram-se ensaios para a extracção da fracção biodisponível e determinação de alguns nutrientes, nomeadamente utilizando o método de Egner-Riehm para a extracção do fósforo assimilável e a extracção por agitação com acetato de amónio 1M para os restantes elementos considerados. Estes métodos serão seguidamente explicitados com maior pormenor.

Todas as análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, AmbiTerra, da Universidade de Évora. As amostras recolhidas no campo foram refrigeradas, tendo sido quarteadas sub-amostras que foram secas a 60°C em estufa ventilada (*Beschickung –Loading Modell 100-800 Memmert*) até peso constante. Após a secagem, as amostras foram secas em exsiccador até temperatura ambiente, sendo posteriormente destorroadas, separada a fracção superior a 2 mm e moída a fracção inferior a 2 mm em moinho de ágata. Foram nestas sub-amostras que se realizaram os ensaios químicos, nomeadamente:

- A digestão parcial;
- A extracção sequencial;
- A análise elementar de CHNS;
- A determinação do fósforo total e assimilável.

Os ensaios físicos (porosidade, densidade aparente e das partículas e textura) foram realizados nas amostras preservadas e refrigeradas, após a sua secagem em estufa a 60°C e destorroamento.

### 3.2.1. Ensaio Químicos

#### 3.2.1.1. Digestão Parcial

A digestão parcial das amostras tem como principal objectivo a determinação do seu grau de contaminação através da solubilização, por adição por mistura de ácidos, das fracções orgânicas e mineralógicas não silicatadas. A digestão parcial das amostras foi realizada com 0,5 g de amostra moída, aos quais foram adicionados 5 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 2 ml de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), segundo a metodologia da EPA para a digestão parcial de solos (U.S.EPA, 2007), tendo-se procedido à sua digestão num digestor de microondas de alta pressão *Anton Paar Multiwave PRO* (Figura 3.7). Os extractos resultantes desta digestão foram diluídos em água ultrapura até volume final de 25 ml e refrigerados até análise por espectrometria de emissão óptica com fonte indutiva de plasma (ICP-OES *Perkin Elmer Optima 8300*) (Figura 3.8).



Figura 3.7: Digestor de microondas de alta pressão no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.

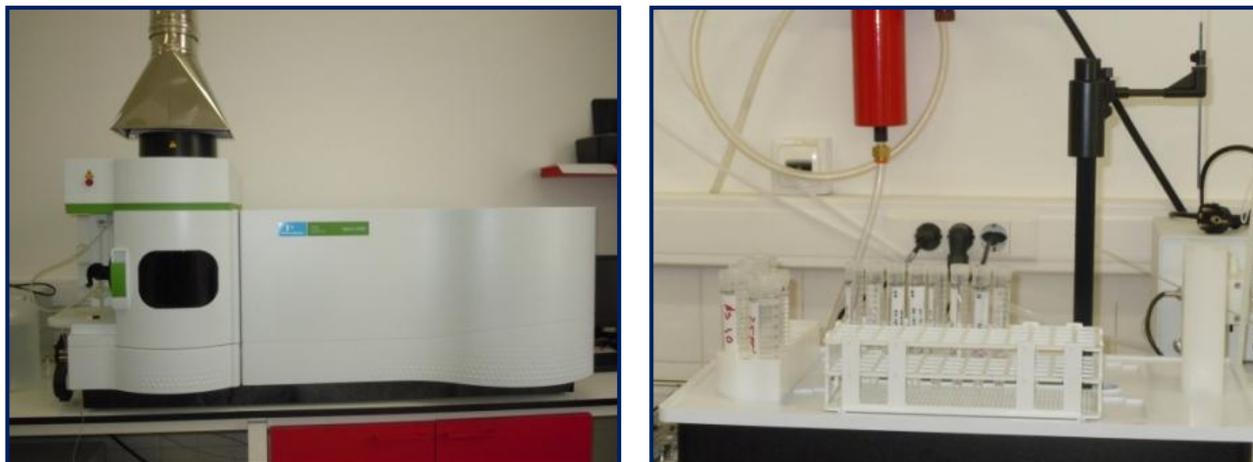


Figura 3.8: Espectrómetro de emissão óptica com fonte indutiva de plasma (ICP-OES) no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.

### 3.2.1.2. Extracção Sequencial

A extracção sequencial permite separar e quantificar gradualmente os elementos metálicos ligados a fases orgânicas e minerais distintas, permitindo assim compreender quais os elementos existentes nas fracções ambientalmente mais solúveis e perigosas, em que proporção cada elemento se encontra associado às diferentes fracções do solo e quais os elementos que podem estar associados a fases quimicamente mais estáveis.

Existem inúmeros métodos de extracção sequencial, no entanto, um dos mais importantes na bibliografia é o método de Tessier *et al.* (1979). Estes autores identificam cinco fracções principais que podem facilmente ser separadas, a partir da agitação prolongada e sequencial com extractantes específicos, com poder de solubilização progressivamente mais forte:

- A fracção mais solúvel, associada a processos de adsorção e desadsorção em minerais de argila, óxidos ou hidróxidos de ferro e manganês ou em matéria orgânica, em que qualquer alteração química da fase aquosa pode levar à sua solubilização;
- A fracção ligada a carbonatos, muito susceptível a alterações de pH;
- A fracção ligada a óxidos de ferro e manganês, susceptível a alterações do Eh das águas, especialmente se estes minerais forem secundários;
- A fracção ligada a matéria orgânica pode possuir uma grande quantidade de metais pesados devido à capacidade de complexação e peptização de ácidos húmicos e fúlvicos. A quantificação desta fracção é muito importante, uma vez que estes materiais podem ser degradados em condições oxidantes;

- A fracção residual, que após solubilização e remoção das fracções anteriores, deverá corresponder a minerais primários e secundários que contém metais pesados no interior da sua estrutura cristalina.

O método de extracção sequencial adoptado no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora corresponde ao método utilizado no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Aveiro, que consiste numa adaptação do método clássico de Tessier *et al.* (1979). Este método baseia-se em cinco etapas:

1) Solubilização das fracções mais solúveis e ligadas a carbonatos:

Pesou-se cerca de 1 g de amostra e colocou-se num frasco com tampa, adicionando-se 20 ml de acetato de amónio 1M a pH aproximadamente 4,5. As amostras foram levadas a agitação contínua num agitador orbital (*Edmund Bühler GmbH SM-30*) durante 640 minutos (10h40). Findo este período, as amostras foram centrifugadas (centrífuga *Rotanta 460R, Hettich Zentrifugen*) e o sobrenadante filtrado para um frasco de polietileno. O extracto líquido foi refrigerado até análise em ICP-OES, enquanto que o resíduo sólido foi seco em estufa ventilada (*Beschickung –Loading Modell 100-800 Memmert*) e pesado.

2) Solubilização da fracção ligada a óxidos de manganês

Ao resíduo resultante da extracção anterior adicionaram-se 20 ml de cloridrato de hidroxilamina 0,05M numa solução de ácido nítrico 0,026M. As amostras foram levadas a agitação contínua durante 10 horas sendo que, finda a agitação, se procedeu à centrifugação e filtragem do sobrenadante para frascos de polietileno. O extracto líquido foi refrigerado até análise em ICP-OES, enquanto que o resíduo sólido foi seco em estufa ventilada e pesado.

3) Solubilização da fracção ligada a óxidos de ferro amorfos

Ao resíduo da extracção anterior adicionaram-se 40 ml de reagente TAMM (uma mistura de ácido oxálico e oxalato de amónio), tendo-se levado as amostras a agitação contínua em ambiente escuro durante 10 horas. Finda a agitação, procedeu-se à centrifugação das amostras e à filtragem do sobrenadante para frascos de vidro ou *teflon*.

Por a análise de extractos ricos em oxalatos ser muito complexa, procedeu-se à destruição dos oxalatos segundo o método desenvolvido por Cardoso Fonseca (Bolle *et al.*, 1988). Deste modo, à solução resultante da extracção adicionaram-se 20 ml de *aqua regia*

(solução ácida na razão de 3:1 de ácido clorídrico e ácido nítrico). Levou-se esta solução a evaporação completa por aquecimento em banho de areia a uma temperatura de 50°C. Adicionaram-se 3 ml de peróxido de hidrogénio e aqueceu-se novamente até evaporação total. Ao resíduo resultante adicionaram-se 25 ml de água acidificada com ácido nítrico (com pH entre 2,5 e 3), sendo esta solução preservada e refrigerada até análise das concentrações em ICP-OES.

4) Solubilização da fracção ligada a matéria orgânica e parcialmente a sulfuretos

Ao resíduo da extracção anterior adicionaram-se 20 ml de peróxido de hidrogénio a 35%, em pequenas quantidades, para evitar demasiada efervescência. As amostras foram colocadas em banho de areia a uma temperatura de 60°C, adicionando-se 2 ml de peróxido de hidrogénio e deixou-se evaporar. Este processo foi repetido até não se verificar efervescência. A este resíduo seco adicionaram-se 10 ml acetato de amónio 1M e levaram-se as amostras a agitação contínua durante 1 hora. Finda a agitação, as amostras foram centrifugadas e o sobrenadante filtrado para frascos de polietileno. O extracto foi preservado e refrigerado até análise em ICP-OES e o resíduo seco em estufa ventilada e pesado.

5) Solubilização da fracção ligada a óxidos de ferro cristalinos

O resíduo sólido proveniente da extracção anterior foi colocado em recipientes resistentes a altas temperaturas, marcando-se o nível correspondente a 40 ml em cada recipiente. Adicionaram-se 40 ml de reagente TAMM e colocaram-se os recipientes com as amostras numa câmara com radiação ultravioleta. A câmara existente no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora (protótipo fabricado pelo laboratório) possui seis lâmpadas UV com 300 V cada e dois interruptores de modo a que se possam ligar ou desligar três lâmpadas de cada vez (Figura 3.9).

As amostras ficaram durante 10 horas sob esta radiação, sendo agitadas manualmente durante este período, repondo-se o reagente TAMM perdido por evaporação para perfazer os 40 ml. Findo este período, as amostras são centrifugadas e o sobrenadante é filtrado para copos de vidro ou *teflon*. À semelhança do que acontece com a fracção agitada com reagente TAMM no escuro, também nesta fracção é necessário proceder-se à destruição dos oxalatos segundo o método já referido de Cardoso Fonseca (Bolle *et al.*, 1988).



Figura 3.9: Câmara de radiação ultravioleta (UV) do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.

### 3.2.1.3. Análise Elementar de CHNS

As percentagens de carbono, hidrogénio, azoto e enxofre foram determinadas por análise elementar (analisador elementar *Elementar CHNS vario Micro Cube*) por combustão a alta temperatura e conversão da amostra em gases. A separação dos gases é realizada por um sistema TPD (*Temperature Programmed Desorption*) e a detecção por um sensor TCD (*Thermal Conductivity Detector*) (Figura 3.10).

As amostras utilizadas foram previamente quarteadas e moídas em moinho de ágata, de forma a homogeneizá-las para que sejam representativas, tendo em conta a pequena massa utilizada na análise (cerca de 20 mg). Cada amostra foi pesada em duplicado, sendo a concentração de cada elemento correspondente à média das duas análises.



Figura 3.10: Analisador elementar no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.

#### 3.2.1.4. Determinação do Fósforo Total e Assimilável

O fósforo é um dos principais nutrientes no solo. Portanto, a sua quantificação é de extrema importância, especialmente em estudos que visam o uso agrícola dos solos. Deste modo, e de forma a avaliar a viabilidade da implementação da fitorremediação nos solos da área em estudo, foram determinadas não apenas as concentrações de fósforo total, mas também a sua componente mais solúvel e com capacidade de ser assimilada pelas espécies vegetais.

De modo a determinar a concentração de fósforo total nas amostras, procedeu-se à pesagem de cerca de 1 g de amostra para um cadinho de porcelana. A amostra foi queimada numa mufla (*Nabertherm LE14/11/P300*) à temperatura de 550°C durante pelo menos 2 horas. Esta queima levou à mineralização das complexas moléculas de fósforo e, portanto, à sua conversão em fósforo inorgânico, de muito mais rápida solubilização. Procedeu-se posteriormente à sua extracção, através da agitação contínua durante 18 horas com ácido sulfúrico 1M. Estas amostras foram posteriormente analisadas por espectroscopia de absorção molecular UV/Visível (*Thermo Scientific Evolution 201*) (Figura 3.11) pelo método do ácido ascórbico – molibdato de amónio (Murphy & Riley, 1962).



Figura 3.11: Espectrómetro de absorção molecular UV/Visível do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade de Évora.

Por seu lado, o fósforo assimilável foi extraído segundo o método de Egner-Riehm (Egner *et al.*, 1960 *in* Sardi *et al.*, 2012) por agitação contínua num frasco com tampa de cerca de 2,5 g de amostra com uma solução de lactato de amónio 0,1M e ácido acético 0,4M a pH entre 3,65 e 3,75 durante duas horas. A sua concentração foi determinada, à semelhança do fósforo total, por análise em espectroscopia de absorção molecular UV/Visível pelo método do ácido ascórbico – molibdato de amónio (Murphy & Riley, 1962).

### 3.2.1.5. Ensaio de Lixiviação

Os ensaios de lixiviação realizados consistiram na adição de 400 ml de água ultrapura a pH de aproximadamente 6,5 (pH médio das chuvas locais, adaptado de Fia *et al.* (2013)) a 20 g de amostra seca a 60°C e destorroada. As amostras foram agitadas durante 48 horas, tendo-se procedido à tiragem de sub-amostras após 1 hora, 3 horas, 18 horas, 24 horas e 48 horas de agitação. Estas sub-amostras foram filtradas, tendo-se procedido à análise dos parâmetros físico-químicos de pH e condutividade eléctrica. As amostras foram preservadas e refrigeradas até análise dos elementos metálicos e alcalino-terrosos em ICP-OES.

## 3.2.2. **Ensaio Físicos**

### 3.2.2.1. Textura

Para a determinação da textura dos solos foi colocada uma porção de cada amostra, entre 30 e 100 g, a reagir com peróxido de hidrogénio, inicialmente diluída a cerca de 30 Vol., até uma concentração de 130 Vol. Este processo é realizado adicionando progressivamente concentrações mais elevadas até não se verificar efervescência, de modo a destruir toda a matéria orgânica presente nas amostras.

As amostras foram posteriormente lavadas com água destilada, secas em banho de areia e crivadas num crivo de 2 mm e, com um crivo de 63 µm. Devido à granularidade em geral muito fina das amostras, este processo de separação foi realizado por via húmida, por se verificar uma elevada agregação após a secagem.

As fracções retidas nos crivos foram secas e pesadas, correspondendo às fracções balastro (> 2 mm) e areia média e grosseira (entre 2 mm e 63 µm). A fracção inferior a 63 µm foi reservada e

procedeu-se à separação de sub-fracções por pipetagem, através da utilização de uma Pipeta de Andersen (Figura 3.12). Esta fracção foi, numa primeira fase, desfloculada com hexametáfosfato de sódio 0,1M, tendo-se procedido à colheita das fracções limo + argila e argila após agitação, segundo a lei de Stokes. Deste modo, foi possível determinar as proporções de areia + balastro ( $> 20 \mu\text{m}$ ), limo (entre  $20$  e  $2 \mu\text{m}$ ) e argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ) e classificar as amostras através da sua representação no diagrama triangular de Atterberg (Pettijohn, 1975) (Figura 3.13).



Figura 3.12: Pipeta de Andersen do Laboratório de Geociências da Universidade de Évora.

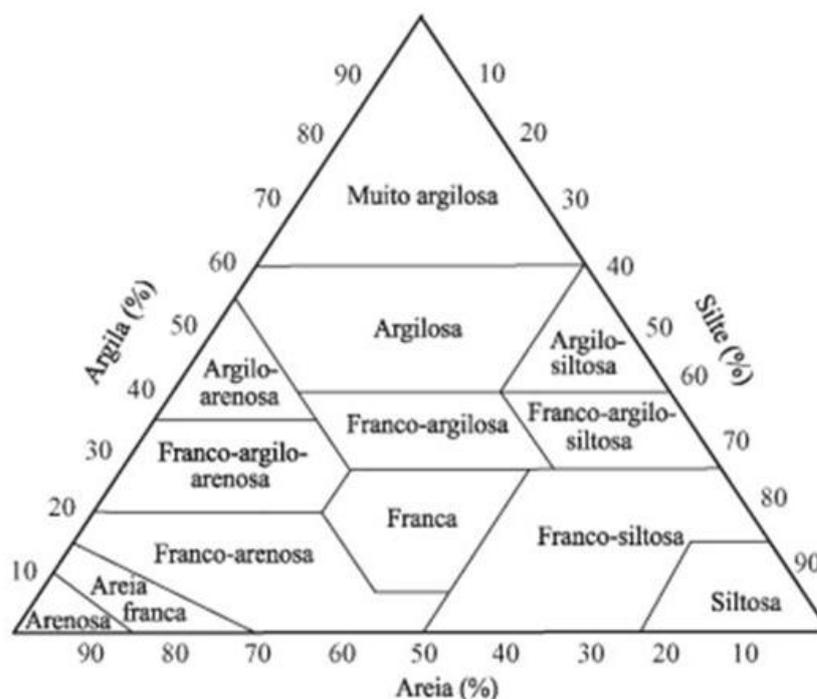


Figura 3.13: Diagrama triangular de Atterberg utilizado para classificação das amostras de solo. Adaptado de Pettijohn (1975).

### 3.2.2.2. Densidade (Aparente e das Partículas) e Porosidade

Especialmente nos solos, a determinação da porosidade é muito importante, uma vez que esta se relaciona com a percentagem de vazios que este possui, característica esta que é de grande importância em estudos de implementação de espécies vegetais nesse solo, uma vez que pode adjuvar o melhor desenvolvimento e crescimento radicular, levando a um mais fácil estabelecimento das espécies vegetais.

A densidade de um solo é dada pela razão entre a massa da amostra e o volume que ocupa. Por seu lado, a densidade das partículas refere-se apenas à parte sólida da amostra, excluindo os poros e a percentagem em água, sendo apenas dependente da composição química da amostra e da estrutura dos minerais que a compõem (Wardlab).

A porosidade ( $P$  (%)) é então dada por uma relação entre a densidade aparente ( $D_{ap}$ ) e a densidade das partículas ( $D_{part}$ ), através da relação:

$$P (\%) = 1 - \left( D_{ap} / D_{part} \right) \times 100$$

Na determinação da densidade aparente das amostras procedeu-se à sua colocação num copo de pequena dimensão e volume conhecido. Este foi seco em estufa ventilada a 105°C, e pesado, sendo a densidade aparente ( $D_{ap}$ ) dada por:

$$D_{ap} = \frac{m \text{ (seco a } 105^{\circ}\text{C)}}{V \text{ copo}}$$

A densidade das partículas foi obtida pelo aquecimento de uma massa de amostra conhecida dentro de um balão volumétrico com água destilada. A libertação do ar existente nos poros das amostras foi conseguida pela ebulição desta solução durante 10 minutos, o que permitiu determinar a densidade das partículas a partir da relação:

$$D_{part} = \frac{m \text{ (seco a } 105^{\circ}\text{C)}}{V \text{ particulas}}$$





## **4. Resultados**



## Resultados

### 4.1. Tipos de Solo

Na área amostrada identificam-se vários tipos de solo, identificados no campo, os quais estão representados na Tabela 4.1.

Entre estes, destaca-se o solo do tipo Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) (Figura 4.1), um solo pobre em sílica e em elementos como o  $\text{Ca}^{2+}$ , o  $\text{Mg}^{2+}$  e o  $\text{K}^+$ , sendo rico em óxidos de ferro e alumínio, o que lhe confere um aspecto maciço. É ainda um solo ácido (de pH entre 4,0 e 5,5), rico em minerais como a caulinite, óxidos de ferro (hematite e goetite) e óxidos de alumínio (gibbsite), que lhe confere a coloração vermelha e amarela. Apesar de possuírem uma grande porosidade e permeabilidade, estes solos apresentam uma grande tendência de formar crostas argilosas à superfície, tornando-os pouco permeáveis à infiltração de água e apresentam baixa fertilidade (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).



Figura 4.1: Solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo.  
Adaptado de Agência Embrapa de Informação Tecnológica.

O Gleissolo Háptico (Figura 4.2) é um solo mal drenado, encontrando-se permanente ou periodicamente saturado por água, o que favorece a redução e solubilização do ferro. É um solo que pode ser muito variável quanto à sua mineralogia e textura, no entanto, o facto de se encontrar saturado em água torna-o pouco fértil devido a problemas de drenagem e acidez (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).



Figura 4.2: Solo do tipo Gleissolo Háplico.  
Adaptado de Agência Embrapa de Informação Tecnológica.

Solos Litólicos (Figura 4.3) são solos pouco desenvolvidos, normalmente pedregosos e/ou rochosos. Apresentam poucas alternativas de uso por se tratar de solos pouco espessos e usualmente rochosos e pedregosos. Situam-se normalmente em áreas acidentadas de serras e zonas de declive acentuado, constituindo estes factores, limitações para o seu uso agrícola (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).

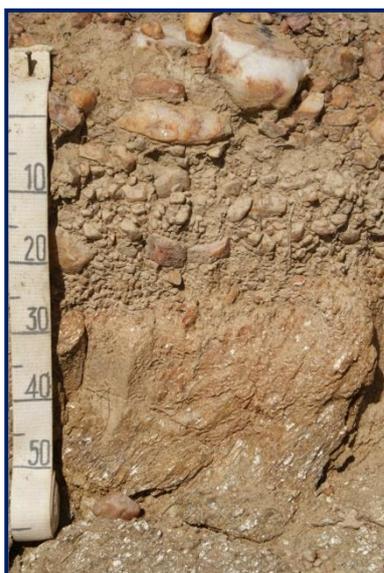


Figura 4.3: Solo Litólico.  
Adaptado de Agência Embrapa de Informação Tecnológica.

Tabela 4.1: Tipos de solo amostrados na área em estudo.

Amostras	Tipo de Solo	Vegetação
CA0-1B	<b>Solo:</b> Solo Litólico (RL)	Não tem
CA0-1C	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo + Solo Litólico (LA + RL)	Não tem
CA0-2C	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Braquiária
CA0-3B	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo (LA)	Não tem
CA0-3C	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo + Solo Litólico (LA + RL)	Não tem
CA1-19	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo + Solo Litólico (LVA + RL)	Mato
CA1-33	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho (LV)	Não tem
CA3-15	<b>Solo:</b> Solo Litólico (RL)	Não tem
CA3-17	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo + Solo Litólico (LVA + RL)	Não tem
CA4-9	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) + Aterro	Não tem
CA4-40 Ocre	<b>Fragmentos:</b> Minério de ferro oxidado	Não tem
CA4-40	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Não tem
CA4-40	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Não tem
CA4-41A	<b>Solo:</b> Aterro	Não tem
CA4-41B	<b>Fragmentos:</b> Enxofre	Não tem
CA4-41C	<b>Solo:</b> Aterro	Não tem
CA4-54 [III]	<b>Solo:</b> Latossolo	Não tem
CA5-1	<b>Solo:</b> Aterro	Eucalipto e Leucénia

CA5-2	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Folhagem
CA5-3	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Folhagem e Espécies invasoras
CA5-4	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Eucalipto
CA5-5	<b>Solo:</b> Gleissolo Háptico (GX)	Capim e Bananeira
CA5-7	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Braquiária
CA5-42	<b>Fragmentos:</b> Sulfatos Hidratados	Não tem
CA5-43	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Não tem

#### 4.2. Parâmetros Físico-Químicos (pH e Eh)

Os parâmetros físico-químicos permitem compreender a adequabilidade dos solos, especialmente se se pretender utilizá-los para fins agrícolas. O potencial de hidrogénio (pH) controla a solubilidade de nutrientes no solo, exercendo uma grande influência sobre a sua absorção nas plantas, sendo que níveis óptimos de pH para o desenvolvimento de plantas se encontram entre 6,0 e 6,5, podendo este intervalo ser estendido entre 5,5 e 7,0 (Brady & Weil, 1996 *in* Brown, 2011; Agência Embrapa de Informação Tecnológica; Wardlab).

Os valores correspondentes a todas as amostras encontram-se em Anexo na Tabela A.2. Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores mínimos, máximos, médios e medianos de pH e Eh dos solos nas várias áreas amostradas. A Tabela 4.2 mostra-nos um aumento dos valores médios, medianos e máximos de pH das áreas A1, A3, A4 e A5 em relação à área A0, sendo que não se verificam grandes diferenças em relação ao valor mínimo.

O Eh (potencial de oxidação/redução) não varia significativamente quando comparamos as diferentes áreas, caracterizando-se por um potencial tipicamente oxidante de um clima tropical.

Tabela 4.2: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de pH e Eh dos solos.

	pH	Eh (mV)		pH	Eh (mV)
<b>Área A0</b> N = 13			<b>Área A3</b> N = 5		
Mínimo	4,63	150	Mínimo	4,66	264
Máximo	5,73	319	Máximo	8,22	310
Média	4,97	239	Média	6,31	283
Mediana	4,87	215	Mediana	5,89	281
<b>Área A1</b> N = 5			<b>Área A4</b> N = 14		
Mínimo	4,79	229	Mínimo	3,42	192
Máximo	6,37	260	Máximo	6,72	402
Média	5,76	243	Média	5,14	258
Mediana	6,15	243	Mediana	5,58	250
			<b>Área A5</b> N = 23		
			Mínimo	4,67	141
			Máximo	7,63	356
			Média	6,03	257
			Mediana	5,84	264

### 4.3. Digestão Parcial

No contexto deste trabalho, a digestão parcial é uma primeira abordagem à contaminação local, caracterizando-se pela lixiviação por adição por mistura de ácidos das fracções orgânicas e inorgânicas passíveis de serem extraíveis na Natureza, por meteorização, não destruindo, por isso, as redes cristalinas dos minerais silicatados e óxidos resistentes.

As Tabelas 4.4 a 4.6 correspondem aos valores mínimos, máximos, médios e medianos dos principais metais e metalóides, tendo-se procedido à análise de arsénio, cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco, enquanto que na Tabela 4.3 se apresentam os valores críticos de acção segundo a legislação do Estado de Minas Gerais (COPAM, 2011; CONAMA, 2012), sendo que os correspondentes teores para cada uma das amostras se encontra em Anexo na Tabela A.3.

A Tabela 4.4 compara directamente os teores destes elementos na área A0 com os valores correspondentes na área A1, o que permite identificar alguns dos principais contaminantes, nomeadamente o arsénio, o cádmio, o cobalto (em menor escala), o cobre, o chumbo e o zinco. Verifica-se ainda que os metais mais preocupantes na área A1 são o chumbo e o zinco.

Tabela 4.3: Valores de referência para a qualidade dos solos.  
VRQ – Valor Referência de Qualidade; VP – Valor de Prevenção; VI Industrial – Valor de Investigação Industrial.

Solos (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 75	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	75	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	75-400	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 400	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela 4.4: Valores mínimos, máximos, de média e mediana dos teores de metais pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) e metalóides (As) nos solos das áreas A0 e A1.

	Área A0 N = 13				Área A1 N = 5			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,25	1,657	0,243	< 0,25	< 0,25	42,572	21,642	25,916
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,025	0,465	0,121	< 0,025	< 0,025	10,653	5,979	8,038
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,993	3,045	2,101	2,097	4,385	15,006	9,611	11,22
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	18,878	57,254	24,956	22,753	28,867	45,753	36,408	35,08
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	14,431	83,634	32,263	19,299	24,53	515,831	265,659	362,047
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	23845,23	39714,4	31719,06	31901,53	40546,47	183232,9	109558	131878,4
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	35,163	380,643	123,502	58,592	118,707	1096,285	633,75	778,479
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	6,124	8,661	7,974	8,118	10,189	20,499	15,57	17,606
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	3,707	6,544	4,82	5,072	5,848	2763,113	1300,765	1827,366
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	21,397	207,617	65,861	49,208	153,483	47947,24	24679,63	36419,3

A Tabela 4.5 identifica a área A3 como muitíssimo preocupante em relação ao arsénio, mostrando ainda teores muito elevados em cádmio, cobre e zinco. Por outro lado, a área A4 caracteriza-se por uma maior contaminação em cobre, possuindo igualmente valores críticos relativamente ao zinco e cádmio e, em algumas amostras, ao cobalto. A área A5, expressa na Tabela 4.6, é claramente a área com os solos mais contaminados, especialmente em arsénio (com um máximo de 6270 mg.kg<sup>-1</sup>), cádmio (com um teor máximo de cerca de 9945 mg.kg<sup>-1</sup>), cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco (cerca de 151920 mg.kg<sup>-1</sup> no seu valor máximo, o que corresponde aproximadamente a cerca de 15% de zinco nesta amostra).

Tabela 4.5: Valores mínimos, máximos, de média e mediana dos teores de metais pesados (cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e metalóides (arsénio) nos solos das áreas A3 e A4.

	Área A3				Área A4			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,25	1731,086	682,702	5,153	< 0,25	7,147	1,273	< 0,25
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,732	157,01	55,986	11,537	< 0,025	28,634	8,697	6,874
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,543	7,161	4,413	4,271	0,294	143,028	19,17	9,448
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	19,742	131,664	44,142	23,811	15,839	216,724	48,458	37,845
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	19,106	1046,816	375,885	57,078	15,828	4097,49	404,854	122,361
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	31088,07	44503,19	37232,25	36512,7	1195,94	159553,6	53398,87	44950,49
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	103,982	1107,383	532,314	312,597	13,54	691,697	300,72	289,967
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	8,475	21,079	13,602	9,258	4,511	17,857	12,258	12,593
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	6,209	165,363	77,306	48,226	4,969	884,978	159,385	33,600
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	207,138	15306,33	6085,174	1905,811	23,553	10115,92	2608,832	921,871

Tabela 4.6: Valores mínimos, máximos, médios e medianos dos teores de metais pesados (cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e metalóides (arsénio) nos solos da área A5.

	Área A5			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,25	6270,019	298,609	< 0,25
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,108	9944,943	598,885	10,647
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,146	1125,049	54,082	4,18
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	5,674	49,123	22,045	20,918
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	15,215	54505,79	2506,349	46,723
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	2499,16	67615,63	34876,62	32494,51
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	35,127	1914,598	307,981	153,953
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	5,854	573,061	36,91	10,211
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	3,426	1892,958	183,979	14,397
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	82,788	151921,4	14378,52	768,647

#### 4.4. Extracção Sequencial

Os resultados totais obtidos pela análise dos extractos resultantes da extracção sequencial encontram-se representados em Anexo nas Tabelas A.4 a A.12. No entanto, para mais facilmente interpretarmos estes teores e o que podem corresponder em termos de contaminação nos diferentes elementos metálicos analisados, optou-se por representar estes teores por percentagem, para cada um dos metais (Tabela 4.7).

De uma forma geral, se as percentagens extraídas forem maiores para as primeiras fracções, ligadas à fracção solúvel, a carbonatos ou a óxidos de manganês (fracções #1 e #2, respectivamente), estes elementos metálicos serão mais solúveis e mais facilmente extraíveis das amostras. Por outro lado, se os valores forem superiores nas fracções #4 e #5, estarão em fracções mais estáveis e mais dificilmente solubilizáveis.

Deste modo, elementos como o cádmio, o cobalto, o manganês e o zinco encontram-se essencialmente associados às fases mais móveis, enquanto que o crómio, o ferro e o níquel se associam a fases mais estáveis. Por outro lado, elementos como o cobre, o chumbo apresentam um comportamento misto, identificando-se quer nas fracções mais móveis, quer nas fracções mais estáveis, o que se poderá dever à localização e características das próprias amostras.

Tabela 4.7: Valores mínimos, máximos, de média e mediana da percentagem extraída para cada elemento metálico (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) nas diferentes fases da extracção sequencial.

#1: fracção solúvel e ligada a carbonatos; #2: fracção ligada a óxidos de manganês; #3: fracção ligada a óxidos de ferro amorfo; #4: fracção ligada a material orgânico e parcialmente a sulfuretos; #5: fracção ligada a óxidos de ferro cristalinos.

	#1 (%)	#2 (%)	#3 (%)	#4 (%)	#5 (%)
<b>Cd</b>					
Mínimo	24,19	5,02	0,50	0,28	0,50
Máximo	85,24	69,69	18,22	43,09	17,33
Média	68,59	18,37	3,57	6,94	3,26
Mediana	74,11	16,02	2,72	2,22	0,50
<b>Co</b>					
Mínimo	0,08	6,33	0,50	0,21	0,50
Máximo	50,32	94,63	77,06	25,05	87,38
Média	14,20	57,13	11,82	4,85	12,53
Mediana	9,31	65,28	2,61	1,53	0,50
<b>Cr</b>					
Mínimo	0,01	0,50	0,96	2,77	0,50
Máximo	4,92	0,50	46,01	87,51	94,68
Média	0,85	0,50	9,29	15,47	74,75
Mediana	0,50	0,50	5,21	8,18	85,87

Cu					
Mínimo	0,40	0,26	0,15	0,15	3,83
Máximo	70,55	63,47	16,42	14,14	97,38
Média	23,65	14,15	7,21	3,07	52,01
Mediana	12,55	11,93	6,98	2,13	57,05
Fe					
Mínimo	0,01	0,11	3,31	0,23	77,07
Máximo	0,62	1,98	15,23	8,31	95,01
Média	0,21	0,84	6,56	2,27	90,12
Mediana	0,15	0,73	4,58	1,39	92,39
Mn					
Mínimo	3,68	3,73	0,50	0,05	3,47
Máximo	26,41	80,71	39,75	3,10	91,15
Média	10,88	56,37	8,92	0,92	22,93
Mediana	7,82	66,18	7,33	0,88	13,24
Ni					
Mínimo	0,50	0,50	0,18	0,65	21,38
Máximo	51,86	37,58	58,49	14,48	81,69
Média	14,81	14,56	20,87	5,05	44,84
Mediana	7,38	11,14	18,76	4,33	40,32
Pb					
Mínimo	7,10	5,45	0,50	0,05	9,54
Máximo	61,01	45,02	16,64	9,80	81,70
Média	28,56	26,79	9,35	2,43	33,03
Mediana	28,89	30,13	9,50	0,97	22,71
Zn					
Mínimo	39,43	12,18	0,24	0,04	0,50
Máximo	83,67	44,21	15,04	10,35	13,30
Média	61,47	27,19	3,03	3,16	5,29
Mediana	60,43	27,96	1,21	1,29	3,90

#### 4.5. Análise Elementar de CHNS

As concentrações totais de carbono, hidrogénio, azoto e enxofre, para cada uma das amostras analisadas, encontram-se em Anexo, na Tabela A.13. A análise elementar (Tabela 4.8) permite uma comparação directa entre os solos não contaminados típicos da área (A0) com os solos presentes na envolvente da unidade de Três Marias. De uma forma geral, observa-se um enriquecimento em carbono, especialmente se nos focarmos nos teores máximos em cada área, à excepção da área A3. Este facto poderá dever-se ao tipo de solo associado a este local e à sua incipiência.

As concentrações em azoto nas áreas A1, A3 e A4 são muito semelhantes aos encontrados na área A0, quer nos seus valores médios e medianos, como nos valores máximos. No entanto, na área A5 verifica-se um grande aumento, especialmente nos valores máximos em azoto, assim como em carbono. Estes valores correspondem à amostra CA5-5 (Tabela A.13) que, segundo a Tabela 4.1 se classifica como Gleissolo Háplico e possui vegetação significativa. Como já foi referido, os solos do tipo Gleissolo Háplico são tipicamente mal drenados, podendo estar saturados em água todo o ano, o que sugere uma grande acumulação de material orgânico e favorece a actividade dos microorganismos existentes no solo (expresso nas concentrações de carbono e azoto, respectivamente) (Setzer, 1941).

Em todas as áreas os valores de enxofre são superiores aos observados na área A0, o que se poderá dever a resíduos de antigos depósitos de enxofre, identificados na Figura 1.3, assim como a outros resíduos provenientes do funcionamento da unidade industrial, passando pela utilização de sulfuretos no fabrico industrial e ao transporte dos resíduos para as barragens de contenção, o que aumentou as concentrações de enxofre até um máximo de cerca de 5,7% na área A5.

Tabela 4.8: Valores mínimos, máximos, de média e mediana obtidos para o carbono (C), hidrogénio (H), azoto (N) e enxofre (S) por análise elementar dos solos.

	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]		C [%]	H [%]	N [%]	S [%]		
<b>Área A0</b>					<b>N = 13</b>	<b>Área A3</b>					<b>N = 5</b>
Mínimo	0,720	0,600	0,060	0,005	Mínimo	0,670	0,469	0,040	0,011		
Máximo	1,610	0,727	0,140	0,026	Máximo	1,530	0,593	0,100	0,039		
Média	1,138	0,666	0,092	0,015	Média	0,900	0,542	0,060	0,026		
Mediana	1,090	0,671	0,100	0,013	Mediana	0,790	0,537	0,060	0,024		
<b>Área A1</b>					<b>N = 5</b>	<b>Área A4</b>					<b>N = 10</b>
Mínimo	0,810	0,681	0,050	0,007	Mínimo	0,210	0,518	0,020	0,032		
Máximo	2,190	0,855	0,150	0,228	Máximo	1,460	1,122	0,110	3,675		
Média	1,212	0,779	0,092	0,084	Média	0,479	0,698	0,048	0,435		
Mediana	1,050	0,817	0,090	0,037	Mediana	0,295	0,642	0,040	0,064		
					<b>Área A5</b>					<b>N = 23</b>	
Mínimo					Mínimo	0,310	0,434	0,020	0,003		
Máximo					Máximo	5,030	1,788	7,320	5,721		
Média					Média	0,924	0,713	0,387	0,297		
Mediana					Mediana	0,780	0,650	0,040	0,021		

## 4.6. Fósforo Total

Os respectivos valores correspondentes a cada uma das amostras analisadas encontram-se em Anexo, na Tabela A.14.

A análise de fósforo total apresentada na Tabela 4.9 permite uma comparação directa entre os teores na área A0 e as restantes áreas. Deste modo, verificam-se teores médios superiores a A0 nas áreas A1, A3 e A5, sendo que a área A4 possui teores médios, medianos e máximos semelhantes aos valores da área A0.

Quimicamente, o fósforo é um dos nutrientes mais reactivos e complexos. Nos solos, os compostos de fósforo tornam-se cada vez mais estáveis e, conseqüentemente, menos solúveis e menos biodisponíveis (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006). Um dos factores que controla o decréscimo da biodisponibilidade de fósforo nos solos é o pH. Em solos com pH ácido, o fósforo ligar-se-á ao ferro e alumínio, formando compostos insolúveis; por seu lado, em solos de pH alcalino, o fósforo tenderá a ligar-se a compostos de cálcio e magnésio (OMAFRA, 2006).

Deste modo, torna-se imperativo para determinar a fertilidade de um solo, a determinação não apenas da fracção total, mas também da fracção assimilável pelas plantas, representada seguidamente.

Tabela 4.9: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de fósforo total determinados nos solos.

P (mg.kg <sup>-1</sup> )		P (mg.kg <sup>-1</sup> )	
<b>Área A0</b>	<b>N = 13</b>	<b>Área A3</b>	<b>N = 5</b>
Mínimo	53,409	Mínimo	66,813
Máximo	138,114	Máximo	244,003
Média	76,423	Média	160,050
Mediana	67,877	Mediana	155,176
<b>Área A1</b>	<b>N = 5</b>	<b>Área A4</b>	<b>N = 14</b>
Mínimo	55,438	Mínimo	7,230
Máximo	152,879	Máximo	124,294
Média	99,698	Média	68,268
Mediana	108,685	Mediana	71,425
		<b>Área A5</b>	<b>N = 23</b>
		Mínimo	26,039
		Máximo	813,197
		Média	103,247
		Mediana	58,021

#### 4.7. Fósforo Assimilável

Esta forma de fósforo representa a fracção deste elemento que se encontra imediatamente disponível para ser assimilada pelas plantas, representando portanto, uma medida do índice de fertilidade desse solo. Os valores de fósforo assimilável nos solos estudados representam-se na Tabela 4.10. Em comparação com os valores de fósforo total, e como já era de esperar tendo em conta a baixa solubilidade dos compostos de fósforo em solos lateríticos, os teores de fósforo assimilável são muito baixos. Os teores respectivos a cada uma das amostras encontram-se em Anexo, na Tabela A.14.

À semelhança do que acontece com o fósforo total, também para o fósforo assimilável os valores nas áreas A1, A3, A4 e A5 são superiores à área A0, sendo que os menores valores se verificam na área A4. O valor máximo ocorre na amostra CA3-15, cerca de  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , valor que corresponde a teores mínimos na mesma área em fósforo total.

Tabela 4.10: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de fósforo assimilável nos solos.

P (mg.kg <sup>-1</sup> )		P (mg.kg <sup>-1</sup> )	
<b>Área A0</b> N = 13		<b>Área A3</b> N = 5	
Mínimo	0,947	Mínimo	1,146
Máximo	9,963	Máximo	52,816
Média	3,129	Média	22,238
Mediana	1,644	Mediana	6,118
<b>Área A1</b> N = 5		<b>Área A4</b> N = 13	
Mínimo	5,790	Mínimo	0,949
Máximo	26,336	Máximo	18,485
Média	16,983	Média	4,420
Mediana	22,326	Mediana	3,348
		<b>Área A5</b> N = 22	
		Mínimo	5,461
		Máximo	18,387
		Média	6,891
		Mediana	5,782

#### 4.8. Ensaio de Lixiviação

Os ensaios de lixiviação realizados nas amostras de solos tiveram como objectivo compreender a solubilidade e mobilidade dos materiais existentes na área em estudo sob condições de precipitação e determinar as fracções lixiviáveis por água (de pH igual às chuvas do local: 6,4-6,5 (adaptado de Fia *et al.*, 2013)). Os resultados totais para todas as amostras encontram-se representados em Anexo, nas Tabelas A.15 a A.19, representando-se seguidamente apenas os valores mínimos, máximos, médios e medianos referentes à fracções lixiviadas após uma (Tabelas 4.11 a 4.13) e vinte e quatro horas de agitação (Tabelas 4.14 a 4.16) da amostra com água ultrapura com pH ajustado ao pH das chuvas da região, na proporção de 1:20.

Após uma hora de agitação, é possível identificar o arsénio como importante contaminante a ser introduzido na rede hidrológica na área A3, tendo-se verificado uma lixiviação média de cerca de 11 mg.kg<sup>-1</sup>. Também o cádmio é um importante contaminante, especialmente se compararmos os valores médios da área A0 com as restantes áreas, verificando-se um máximo de aproximadamente de 30 mg.kg<sup>-1</sup> de cádmio na área A5, após apenas uma hora de agitação. Não se verificam lixiviações significativas para o cobalto, crómio e cobre, verificando-se teores máximos de cerca de 3 mg.kg<sup>-1</sup> de cobalto e de 1 mg.kg<sup>-1</sup> e 0,12 mg.kg<sup>-1</sup> de cobre nas áreas A4 e A5. O níquel e o chumbo apresentam teores muito baixos, com valores máximos de cerca de 1,4 mg.kg<sup>-1</sup> de níquel e 0,9 mg.kg<sup>-1</sup> de chumbo na área A4, o que sugere a sua baixa solubilidade em água. O zinco é um importante contaminante, sendo facilmente arrastado sob condições de precipitação, tendo em conta os teores médios, medianos e máximos registados, especialmente nas áreas A1, A4 e A5.

Os elementos alcalinos e alcalino-terrosos apresentam padrões distintos. O cálcio apresenta teores médios na área A0 inferiores às restantes áreas, enquanto que o potássio e o magnésio possuem teores superiores na área A0 quando comparados com as áreas A1, A3, A4 e A5.

Tabela 4.11: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras das áreas A0 e A1.

1h	Área A0 N = 7				Área A1 N = 3			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	4,409	1,519	1,470	< 0,02	13,257	4,426	< 0,02
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	3,727	53,269	21,019	9,319	60,789	1550,775	699,414	486,680
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,054	0,016	< 0,02	< 0,02	0,693	0,302	0,202
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,1116	0,0371	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	3,244	1,017	0,895	0,031	8,458	2,854	0,075
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	32,286	348,864	113,476	85,042	62,665	141,076	96,235	84,964
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,082	727,631	105,961	2,131	6,886	19,434	12,523	11,248
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,103	1,770	0,478	0,158	0,266	0,582	0,396	0,340
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	1,529	0,232	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,105	0,024	< 0,02	< 0,02	0,400	0,209	0,217
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,348	8,281	2,216	0,808	27,843	153,704	82,793	66,831

Tabela 4.12: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras das áreas A3 e A4.

1h	Área A3 N = 2				Área A4 N = 5			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,570	0,290	0,290	< 0,02	4,704	1,195	0,422
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	9,553	12,900	11,227	11,227	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	74,749	103,958	89,354	89,354	23,213	109,027	49,227	28,211
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,274	0,330	0,302	0,302	0,419	13,424	3,629	0,735
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,745	3,035	1,415	0,906
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,135	0,055	0,051
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,088	0,543	0,680
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,084	0,357	0,220	0,220	0,135	0,669	0,327	0,187
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	25,055	34,489	29,772	29,772	30,997	97,426	76,606	92,627
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	7,637	8,100	7,868	7,868	5,217	168,301	53,905	6,169
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,409	0,210	0,210	2,324	125,284	35,247	5,200
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,374	0,630	0,673
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,906	0,189	< 0,02
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,004	3,388	2,196	2,196	33,204	960,322	281,695	73,099

Tabela 4.13: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após uma hora de agitação das amostras da área A5.

1h	Área A5			N = 15
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	9,910	1,154	0,043
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,388	114,189	41,837	31,624
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	30,741	2,566	< 0,02
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	2,800	0,223	< 0,02
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,121	0,017	< 0,02
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	5,785	0,894	0,169
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	14,987	153,128	55,313	43,992
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,789	29,411	7,297	4,620
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	3,707	0,532	0,111
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,478	0,051	< 0,02
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,819	559,564	54,795	4,573

Após vinte e quatro horas de agitação verifica-se, de um modo geral, e como seria de esperar, um aumento dos teores lixiviados, identificando-se apenas uma diminuição para o potássio. Esta diminuição poderá dever-se ao equilíbrio do sistema, sendo que períodos de agitação superiores poderão não levar a lixiviação de concentrações significativamente mais elevadas.

Podem assim ser identificados alguns elementos mais problemáticos, cuja agitação em água permite a lixiviação de teores importantes e ambientalmente perigosos:

- O arsénio, que apresenta ao fim de vinte e quatro horas de agitação um valor médio de 21,8 mg.kg<sup>-1</sup> na área A3;
- O cádmio, que apresenta um valor máximo de 40,9 mg.kg<sup>-1</sup> na área A5;
- O zinco, que apresenta desde a primeira hora de agitação elevados valores lixiviados, atingindo ao final de vinte e quatro horas valores máximos de 198 mg.kg<sup>-1</sup> na área A1, 998 mg.kg<sup>-1</sup> na área A4 e 783 mg.kg<sup>-1</sup> na área A5.

Tabela 4.14: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras das áreas A0 e A1.

24h	Área A0				Área A1			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,579	20,247	12,823	14,393	< 0,02	61,312	20,444	< 0,02
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	7,047	202,590	67,907	13,365	87,600	2291,171	1028,022	705,294
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,054	0,399	0,180	0,147	0,198	1,119	0,610	0,512
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,065	0,113	0,090	0,090	0,088	0,099	0,093	0,091
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,023	0,128	0,073	0,087	< 0,02	0,052	0,024	< 0,02
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	1,184	0,205	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	6,995	11,758	9,128	8,608	0,170	35,975	12,153	0,315
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	58,049	1042,207	422,030	100,356	88,283	124,844	102,164	93,365
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,313	2027,101	661,146	3,697	11,105	22,154	15,674	13,763
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,379	15,327	3,059	1,224	0,562	1,350	1,035	1,193
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,061	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,142	0,041	< 0,02	< 0,02	0,705	0,242	< 0,02
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,566	3,012	1,459	1,055	42,366	198,826	109,568	87,513

Tabela 4.15: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras das áreas A3 e A4.

24h	Área A3				Área A4			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,263	1,139	0,701	0,701	0,058	5,735	1,655	0,307
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	19,564	24,193	21,879	21,879	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	124,070	161,791	142,931	142,931	18,369	111,043	45,450	24,732
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,663	0,734	0,699	0,699	0,503	13,512	3,702	0,777
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,082	0,088	0,085	0,085	0,686	3,226	1,447	0,857
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,041	0,021	< 0,2
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	1,056	0,566	0,728
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,292	0,751	0,521	0,521	< 0,2	0,826	0,403	0,368
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	34,852	38,629	36,741	36,741	38,218	91,038	68,632	76,000
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	11,788	13,522	12,655	12,655	5,210	175,511	55,589	5,905
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,211	0,613	0,412	0,412	2,466	126,299	35,950	5,384
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,935	0,270	< 0,2
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,092	0,026	< 0,2
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,963	3,780	2,872	2,872	35,475	998,484	291,902	77,715

Tabela 4.16: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de alguns elementos metálicos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), metalóides (As), alcalinos e alcalino-terrosos (K, Ca e Mg) da lixiviação após vinte e quatro horas de agitação das amostras da área A5.

24h	Área A5			
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	26,242	2,776	0,549
As (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,903	136,454	60,207	51,825
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,067	40,957	3,564	0,161
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,081	4,357	0,433	0,091
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	0,051	< 0,2	< 0,2
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,073	12,405	1,646	0,423
K (mg.kg <sup>-1</sup> )	19,012	171,107	46,437	38,363
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,043	29,764	8,553	6,344
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,038	5,562	0,908	0,475
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	0,876	0,077	< 0,2
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,2	0,112	0,022	< 0,2
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,299	783,834	76,440	5,421

#### 4.9. Nutrientes

A determinação da concentração dos nutrientes no solo é um dos factores mais importantes na caracterização da fertilidade de um solo, uma vez que o seu excesso ou deficiência pode perturbar e influenciar negativamente o desenvolvimento e crescimento de espécies vegetais. Os nutrientes do solo necessários ao desenvolvimento de espécies vegetais podem dividir-se em macronutrientes e micronutrientes. Macronutrientes correspondem aos elementos químicos mais importantes no desenvolvimento de espécies vegetais, pois são os elementos que são absorvidos em maior concentração. Por sua vez, os micronutrientes correspondem aos elementos químicos que são absorvidos em menor quantidade, mas que são indispensáveis ao desenvolvimento de espécies vegetais (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

Deste modo, e de forma a determinar-se a biodisponibilidade destes elementos, com o fim de se fazer uma avaliação do grau de fertilidade destes solos e das suas condições de suporte dos ensaios de fitorremediação, procedeu-se à extracção por agitação com acetato de amónio 1M durante 10 horas e 40 minutos, tendo sido os extractos resultantes analisados em ICP-OES. De entre os macronutrientes, foram analisadas as concentrações de cálcio, potássio e magnésio, enquanto que dos micronutrientes foram analisadas as concentrações de cobalto, cobre, ferro, manganês, molibdénio, níquel e zinco. Apresentam-se na Tabela 4.17 as classes de fertilidade do solo e os

respectivos teores, para cada elemento analisado. Os valores completos resultantes desta análise encontram-se em Anexo na Tabela A.20, sendo que os valores correspondentes à análise de alguns parâmetros estatísticos se encontram nas Tabelas 4.18 a 4.20.

Nas Tabelas 4.18 a 4.20 apresentam-se ainda os teores em fósforo. Estes correspondem aos valores de fósforo assimilável determinados pelo método de Egner-Riehm, tendo sido novamente referidos por corresponderem a um importante nutriente no solo.

A Tabela 4.17 foi concebida tendo como base um conjunto de referências bibliográficas de forma a qualificar os valores para cada um dos elementos analisados. Em alguns casos, os valores correspondem a adaptações de legislações de outros países, enquanto que para determinados elementos, por ausência de bibliografia, se optou por utilizar os valores normativos de Investigação Agrícola da legislação do Estado de Minas Gerais (COPAM, 2011; CONAMA, 2012) como teores excessivos (para o caso do cobalto, do molibdénio e do níquel). Para o manganês e para o zinco, os valores tabelados não correspondem ao método de extracção por acetato de amónio, mas sim à extracção por DTPA (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India; Loch, 2006*), no entanto por esta extracção ser correspondente à fracção passível de ser absorvida pelas plantas e por ser, para outros elementos, utilizada em detrimento da extracção por acetato de amónio (para o cobre e o ferro) (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India; Loch, 2006*), optou-se por, neste trabalho, utilizar estes valores para comparar com os teores obtidos nos solos em estudo.

Tabela 4.17: Teores correspondentes às várias classes de fertilidade do solo, para macro e micronutrientes.

Teores adaptados de: <sup>1)</sup> *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*; <sup>2)</sup> *Horneck et al., 2011*; <sup>3)</sup> *Kepner et al., 2003*; <sup>4)</sup> *CONAMA, 2012*; <sup>5)</sup> *Loch, 2006*; <sup>6)</sup> *Dafonte et al., 2010*

Classificação da Fertilidade do Solo		Ca <sup>(1)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	K <sup>(2)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mg <sup>(2)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	P <sup>(3)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )			
Baixa		< 300	< 150	< 60	< 50			
Óptimo		-	150-250	60-300	50-100			
Elevada		-	250-800	> 300	100-200			
Excessivo		-	> 800	-	> 200			

Classificação da Fertilidade do Solo		Co <sup>(4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe <sup>(1; 6)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mo <sup>(1; 4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni <sup>(4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )
Baixa		-	< 0,2	< 2	< 2	< 0,2	-	< 0,6
Óptimo		-	0,2-5	2-13	2-50	-	-	0,6-5
Elevada		-	5-15	13-25	50-500	-	-	5-15
Excessivo		> 35	> 15	> 25	> 500	> 50	> 70	> 15

Tabela 4.18: Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos das áreas A0 e A1.

		Área A0				Área A1			
		N = 10				N = 4			
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Macronutrientes	Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	8,125	281,906	62,228	8,125	78,588	2532,128	950,383	78,588
	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	30,337	97,613	64,469	68,729	38,425	229,950	111,279	88,371
	Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	9,420	42,003	21,401	21,015	19,312	67,543	45,091	46,754
	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,947	9,963	3,1643	1,672	5,790	24,390	14,645	14,200
Micronutrientes	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,047	0,657	0,317	0,283	0,147	0,746	0,410	0,373
	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,516	2,892	1,217	0,996	1,133	76,544	32,885	26,931
	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	9,255	113,872	60,854	52,860	28,416	73,870	59,227	67,310
	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	5,435	51,054	18,733	14,636	22,879	92,367	55,061	52,498
	Mo (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,537	2,107	1,030	0,856	0,178	0,542	0,369	0,378
	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,026	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,765	0,286	0,185
	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,033	110,778	22,878	10,686	25,196	8915,866	4500,105	4529,678

Tabela 4.19: Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos das áreas A3 e A4.

		Área A3				Área A4			
		N = 3				N = 8			
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Macronutrientes	Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	87,439	297,603	175,610	87,439	49,059	1131,239	338,944	49,059
	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	37,959	76,497	52,108	41,868	21,103	137,101	50,180	43,913
	Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	28,210	44,791	36,614	36,841	28,947	73,481	49,546	47,380
	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	4,009	52,816	34,642	47,101	1,086	18,485	5,265	3,369
Micronutrientes	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,202	0,504	0,401	0,498	0,128	2,614	0,703	0,268
	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,635	4,326	3,370	4,150	0,342	44,218	17,657	12,063
	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	20,375	47,627	37,846	45,537	6,254	72,928	34,937	29,423
	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	23,786	68,416	44,048	39,943	24,326	82,250	46,178	39,160
	Mo (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,367	0,437	0,397	0,386	0,237	0,412	0,328	0,334
	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,349	0,134	0,043	0,083	0,873	0,545	0,517
	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	91,812	1207,125	472,466	118,462	289,047	4689,689	1736,837	1105,811

Tabela 4.20: Teores mínimos, máximos, de média e mediana de macro e micronutrientes nos solos da área A5.

		Área A5			
		N = 16			
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Macronutrientes	Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	35,453	1144,538	358,019	35,453
	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	23,432	181,997	64,665	45,326
	Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	8,393	348,166	57,065	34,896
	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	5,461	11,864	6,142	5,751
Micronutrientes	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	1,645	0,510	0,281
	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,678	76,374	15,989	3,751
	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	1,503	404,015	65,149	35,934
	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,906	105,914	30,675	25,797
	Mo (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,203	0,416	0,322	0,331
	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	< 0,02	0,552	0,183	< 0,02
	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	19,175	5490,251	1029,824	257,727

Tendo como base as Tabelas 4.18 a 4.20, é possível identificar que os macronutrientes são maioritariamente deficitários nos solos, especialmente o potássio, o magnésio e o fósforo. Por seu lado, os micronutrientes apresentam muitas vezes valores excessivos, especialmente para o ferro (o que se poderá dever à geologia local), o zinco e o cobre (possivelmente associados à contaminação da área em estudo). O molibdénio apresenta teores óptimos para a implantação de espécies vegetais, enquanto que no manganês se verificam pontualmente teores elevados.

#### 4.10. Textura

As percentagens de areia, limo e argila determinadas para todas as amostras encontram-se em Anexo, representadas na Tabela A.21. A Tabela 4.21 apresenta apenas alguns parâmetros estatísticos relativos às percentagens obtidas para cada fracção, em cada área, o que permite identificar a argila como a fracção mais significativa nos solos da área em estudo. A areia ocupa o segundo lugar de destaque na maioria das áreas estudadas, permitindo classificar estes solos como argilosos ou franco-argilosos (ver Tabela A.21 e Figura 5.46). O limo corresponde assim à fracção menos representativa nas amostras, possuindo percentagens médias entre os 20 e 30%.

Tabela 4.21: Percentagens mínima, máxima, média e mediana de areia, limo e argila nos solos das diferentes áreas.

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Área A0			N = 13	Área A3			N = 5
Mínimo	16,96	6,96	30,46	Mínimo	10,24	9,23	8,98
Máximo	48,68	45,82	59,24	Máximo	81,79	49,22	46,02
Média	29,17	20,28	50,54	Média	37,89	25,98	36,14
Mediana	31,15	19,04	49,91	Mediana	31,14	23,44	40,54
Área A1			N = 5	Área A4			N = 12
Mínimo	14,10	20,77	21,32	Mínimo	15,49	21,52	22,28
Máximo	57,91	36,00	58,52	Máximo	56,21	40,63	51,71
Média	29,03	29,03	41,94	Média	30,98	31,30	37,72
Mediana	21,43	29,96	48,61	Mediana	27,45	31,14	38,88
				Área A5			N = 23
				Mínimo	5,19	4,41	7,10
				Máximo	88,49	37,40	62,28
				Média	36,07	22,92	41,01
				Mediana	36,37	22,14	39,99

#### 4.11. Densidade (Aparente e das Partículas) e Porosidade

A determinação da densidade aparente, da densidade das partículas e da porosidade do solo é muito importante para a determinação da fertilidade de um solo, uma vez que porosidades muito baixas e, por conseguinte, densidades aparentes elevadas, podem indicar que o solo se encontra demasiado compactado para um efectivo desenvolvimento radicular e, consequentemente, para o crescimento das plantas (Wardlab). O mesmo autor refere ainda que porosidades entre 45-50% como bons valores de porosidade, o que corresponderá a uma densidade aparente de cerca de  $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$  para permitir coexistência de espaço para o desenvolvimento radicular e a água nos poros do solo.

Os valores correspondentes à densidade aparente, densidade das partículas e porosidade de todos os solos encontram-se em Anexo, na Tabela A.22. Na Tabela 4.22 apresentam-se os valores mínimos, máximos, médios e medianos das amostras representadas em cada uma das áreas.

Verifica-se assim que a maioria das amostras encontra-se abaixo dos valores óptimos de porosidade para a implementação de espécies vegetais, estando a densidade aparente acima do valor óptimo. Identificam-se apenas em algumas amostras, nas áreas A1 e A5, valores óptimos relativos à densidade aparente e porosidade dos solos.

Tabela 4.22: Valores mínimos, máximos, de média e mediana de densidade aparente, densidade das partículas e porosidade dos solos.

	Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidade Partículas (g.cm <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)		Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidade Partículas (g.cm <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)
<b>Área A0</b>			<b>N = 13</b>	<b>Área A3</b>			<b>N = 5</b>
Mínimo	1,534	2,580	26,512	Mínimo	1,505	2,642	28,602
Máximo	1,905	2,739	42,057	Máximo	1,989	2,850	44,913
Média	1,662	2,638	36,985	Média	1,705	2,750	38,094
Mediana	1,639	2,631	38,363	Mediana	1,540	2,785	42,663
<b>Área A1</b>			<b>N = 5</b>	<b>Área A4</b>			<b>N = 12</b>
Mínimo	1,345	2,528	41,914	Mínimo	1,584	2,361	25,497
Máximo	1,543	3,105	55,520	Máximo	1,887	2,945	44,363
Média	1,454	2,853	48,629	Média	1,674	2,722	38,278
Mediana	1,468	2,960	48,250	Mediana	1,643	2,737	39,059
				<b>Área A5</b>			<b>N = 22</b>
				Mínimo	1,259	2,553	27,447
				Máximo	1,936	3,001	51,541
				Média	1,700	2,726	37,617
				Mediana	1,718	2,713	37,314



## **5. Discussão**



## Discussão

### 5.1. Tipos de Solo

Os dados referentes aos tipos de solo na área em estudo permitiram o mapeamento dos solos identificados na área, dando origem à Figura 5.1.

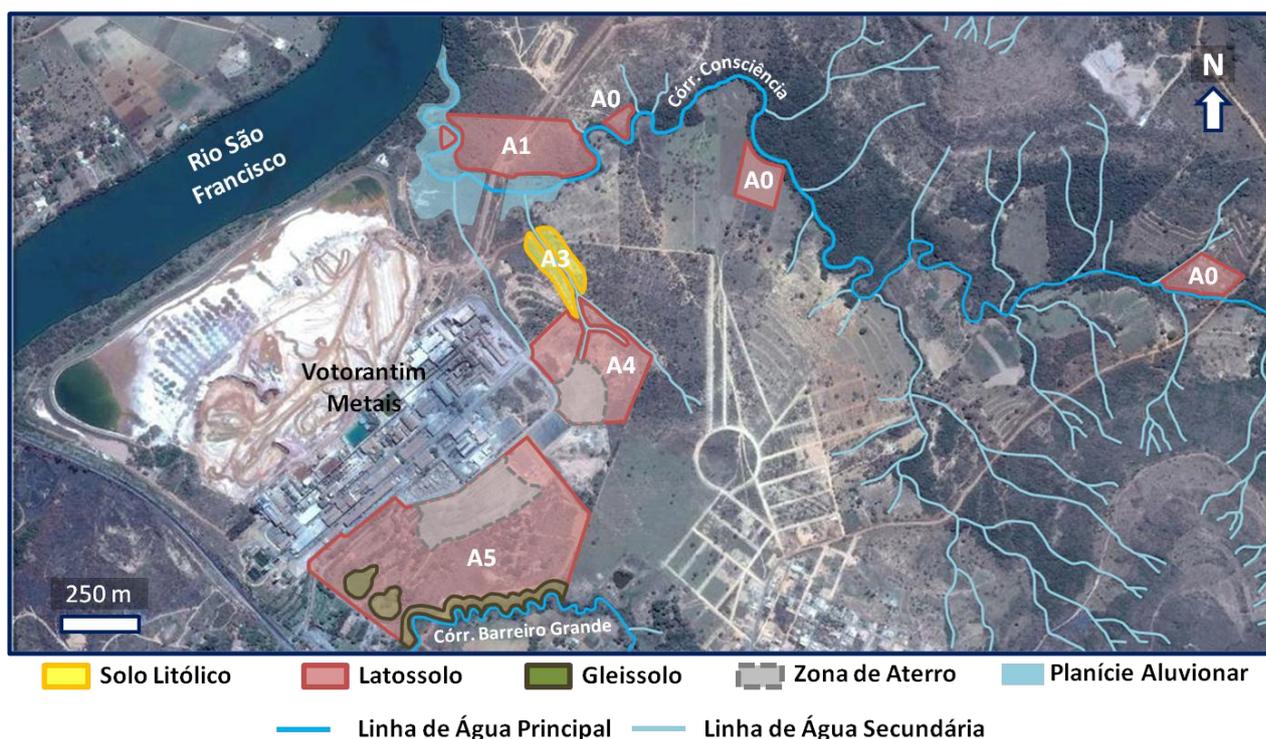


Figura 5.1: Localização geográfica dos diferentes tipos de solo na área em estudo.

Observa-se assim que a maioria da região é ocupada por solo do tipo Latossolo, verificando-se uma área muito restrita, junto a uma linha de água efêmera, onde se identifica solo do tipo Solo Litólico, e uma pequena área mais a Sul, junto ao córrego Barreiro Grande, onde se identifica solo do tipo Gleissolo Háplico. É ainda de notar uma zona com uma dimensão significativa, incluída nas áreas A4 e A5, que corresponde a locais de aterro de resíduos.

## 5.2. Digestão Parcial e Determinação do Grau de Contaminação Local

### 5.2.1. Digestão Parcial

De forma a melhor serem identificados os principais contaminantes do solo e as áreas prioritárias de remediação para cada um desses elementos, aos resultados obtidos na digestão parcial das amostras, procedeu-se à classificação de todas as amostras relativamente ao seu grau de contaminação de acordo com os valores estabelecidos na legislação local para solos (COPAM, 2011; CONAMA, 2012). Projectaram-se então estes valores sobre a área em estudo, identificando em cada amostra quais os elementos que ocorrem acima dos limites legais. Estes mapas encontram-se em Anexo, representados nas Figuras A.1 a A.3. Os valores considerados correspondem aos representados na Tabela A.3.

Por sua vez, as Figuras 5.2 a 5.6 representam ainda estes teores em cada uma das áreas, a sua evolução em profundidade, assim como os limites legais para cada um dos elementos químicos, permitindo assim distinguir as diferenças no seu comportamento geoquímico, as suas características – contaminantes ou não contaminantes – e compreender a dinâmica destes elementos em profundidade.

Os valores de comparação utilizados correspondem ao Valor de Prevenção (VP), ao Valor de Investigação Agrícola e Valor de Investigação Industrial (VI Agrícola e VI Industrial). De acordo com a legislação em vigor (CONAMA, 2012) na área em estudo, o Valor de Prevenção corresponde à concentração de determinado elemento, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo, enquanto que o Valor de Investigação corresponde à concentração de determinada substância no solo, acima da qual existem riscos potenciais à saúde humana, para os cenários agrícola (VI Agrícola), residencial (VI Residencial) ou industrial (VI Industrial).

A área A0 apresenta teores muito abaixo do Valor de Prevenção, verificando-se apenas para o cobre teores superiores a este limite, nomeadamente na amostra CA0-1B, o que se poderá dever a uma contaminação eólica, por passagem de camiões de resíduos para a Barragem da Lavagem ou para o Depósito Murici.

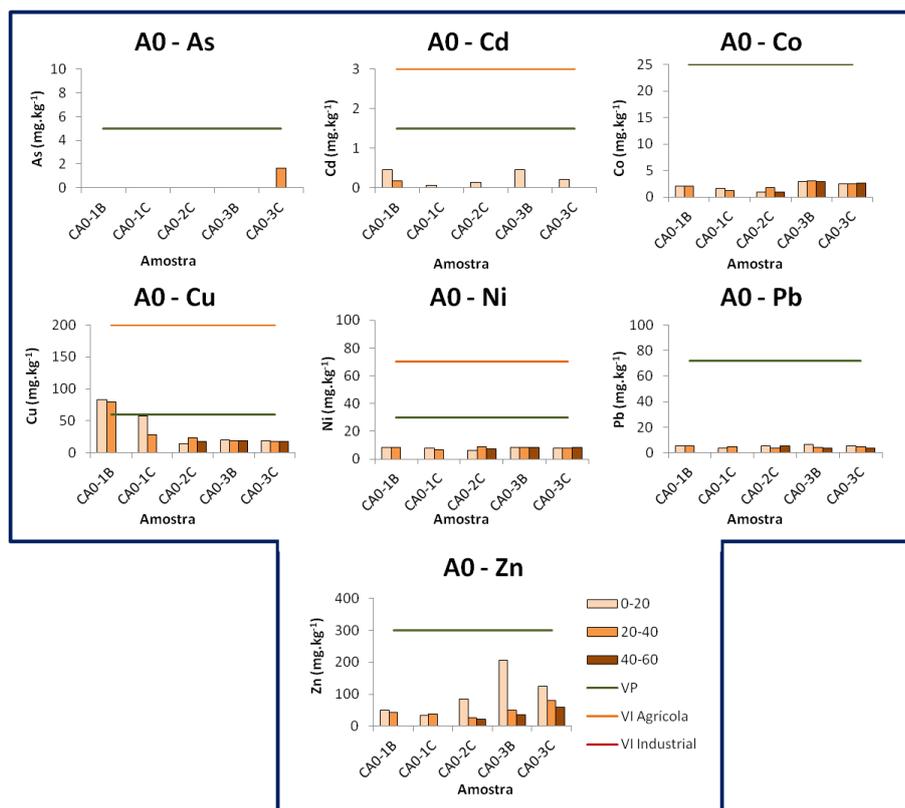


Figura 5.2: Concentração de arsênio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A0 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).

A área A1 apresenta valores muito baixos (abaixo do Valor de Prevenção) para o cobalto e níquel, verificando-se teores superiores ao Valor de Intervenção Agrícola para os restantes elementos, sendo os teores de chumbo e zinco ainda superiores ao Valor de Intervenção Industrial.

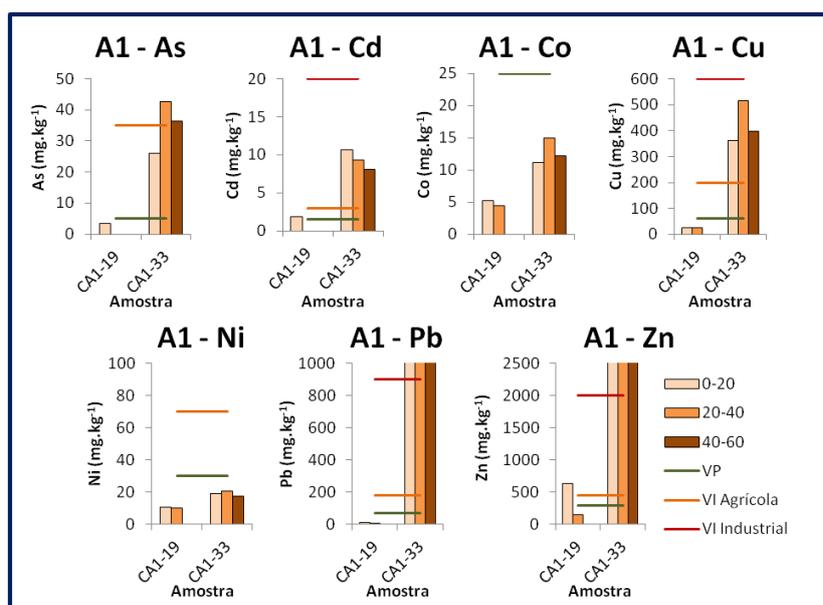


Figura 5.3: Concentração de arsênio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A1 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).

Na área A3, verificam-se teores baixos para o cobalto e níquel (abaixo do Valor de Prevenção), apresentando os restantes elementos valores acima do Valor de Intervenção Agrícola. Para o arsênio, o cádmio, o cobre e o zinco, os teores atingem em algumas amostras valores superiores ao Valor de Intervenção Industrial.

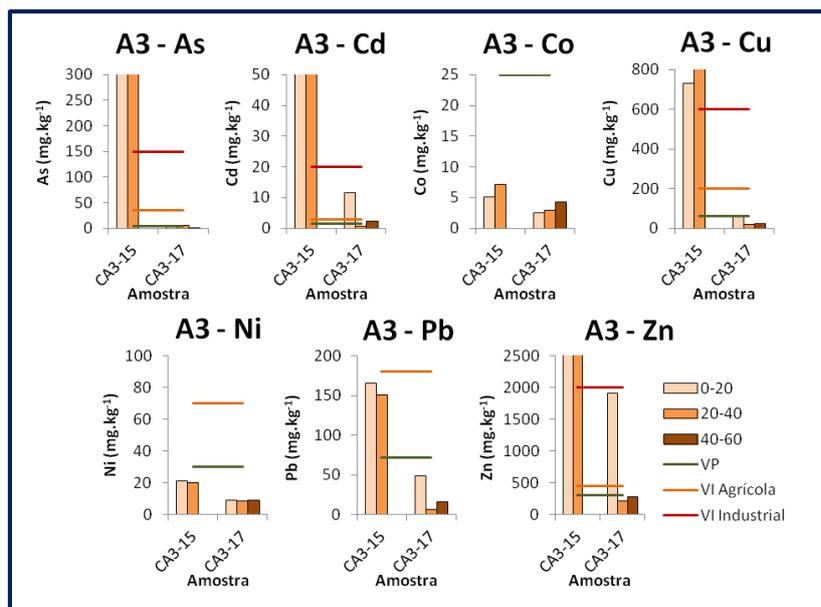


Figura 5.4: Concentração de arsênio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A3 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).

A área A4 apresenta teores inferiores ao Valor de Prevenção para o arsênio, o cobalto, o níquel e o chumbo, sendo que o arsênio atinge valores superiores ao Valor de Prevenção apenas na amostra CA4-41A e o chumbo valores superiores ao Valor de Investigação Agrícola na amostra CA4-54. O cobalto apresenta um valor superior ao Valor de Prevenção (amostra CA4-9) e superior ao Valor de Investigação Agrícola (amostra CA4-41C). O zinco e o cádmio apresentam, em regra, valores superiores ao Valor de Investigação Agrícola, podendo localmente exceder o limite do Valor de Investigação Industrial.

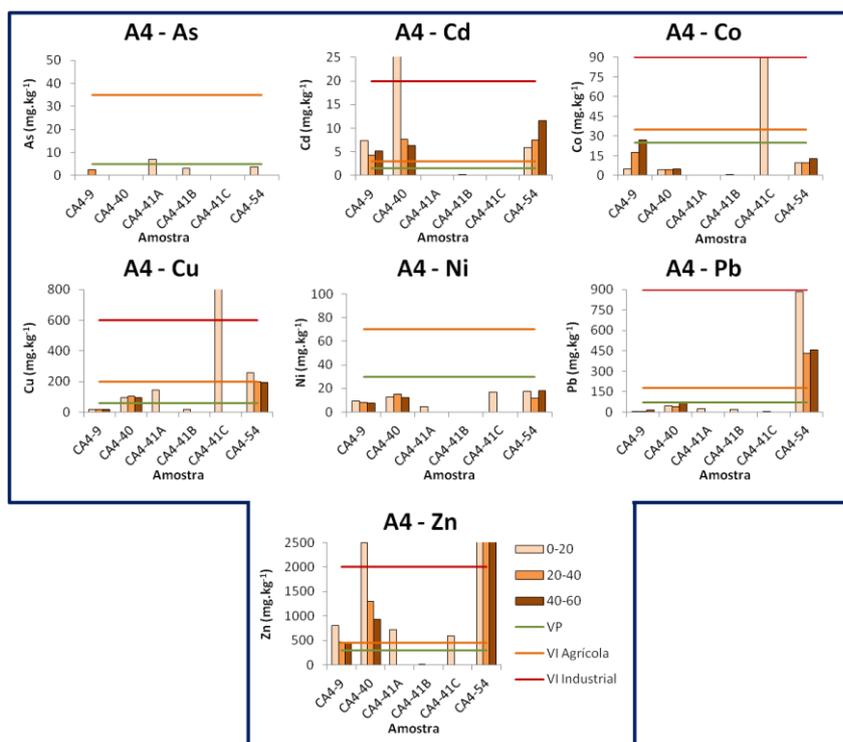


Figura 5.5: Concentração de arsênio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A4 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).

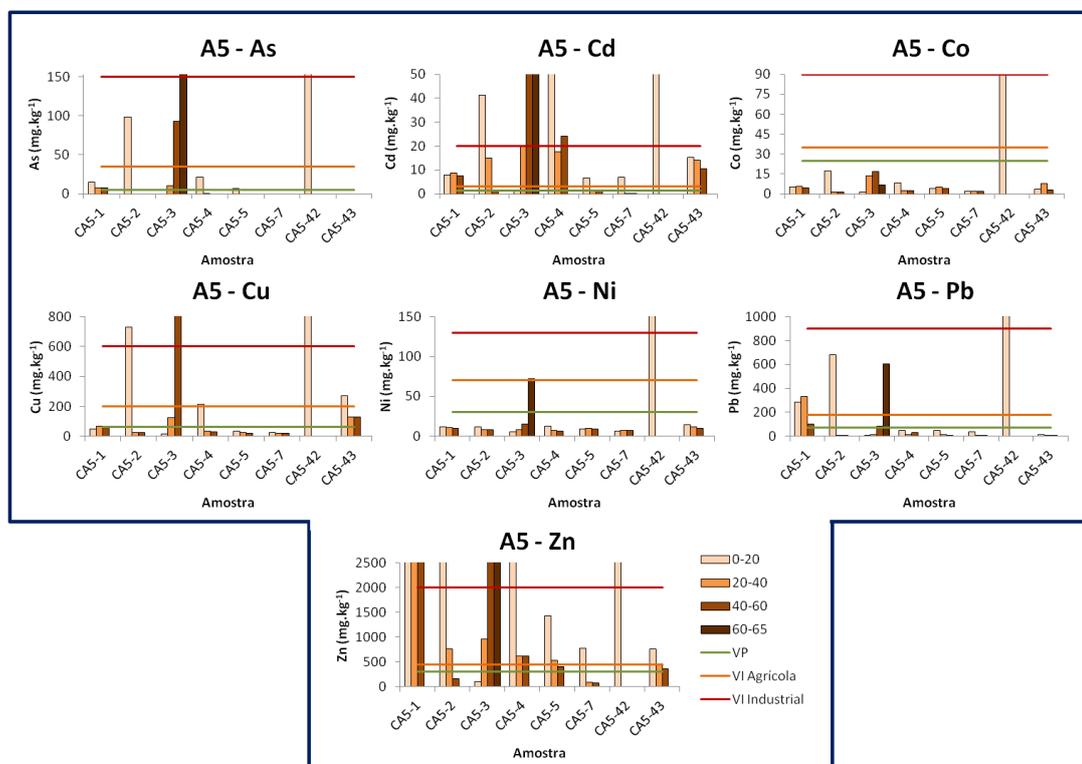


Figura 5.6: Concentração de arsênio, cádmio, cobalto, cobre, níquel, chumbo e zinco nas amostras da área A5 e comparação com limites de referência (CONAMA, 2012).

Na área A5 verifica-se que no cobalto, no cobre e no níquel os valores não excedem, em regra, o Valor de Prevenção, apresentando para o cobalto, um valor superior ao Valor de Intervenção Industrial para a amostra CA5-42; para o cobre, valores superiores ao Valor de Intervenção Agrícola para as amostras CA5-2, CA5-3, CA5-4, CA5-42 e CA5-43; e para o níquel valores superiores ao Valor de Intervenção Agrícola nas amostras CA5-3 e CA5-42. Para o arsénio e chumbo identificam-se localmente valores superiores ao Valor de Prevenção e de Intervenção Agrícola. O cádmio e o zinco apresentam valores superiores ao Valor de Intervenção Agrícola verificando-se ainda teores superiores ao Valor de Intervenção Industrial nas amostras CA5-1, CA5-2, CA5-3, CA5-4 e CA5-42.

Deste modo, e de forma sumária, na área A5, os elementos mais preocupantes são o cádmio e o zinco, devido não apenas aos elevados teores que apresentam, mas também à grande extensão de solo que contaminam, correspondendo o cobre, o arsénio, o cobalto e o chumbo a elementos com contaminações de carácter mais pontual. Na área A3, também o cádmio e o zinco se destacam como os mais preocupantes, seguidos pelo arsénio na amostra CA3-15, que apresenta teores extremamente elevados, correspondendo o cobre e o chumbo a contaminantes de menor extensão. Na área A4, verificam-se teores muito preocupantes em cádmio e zinco, seguidos pelo cobre e chumbo. Por sua vez, a área A1 corresponde a uma área excessivamente contaminada em chumbo e zinco, seguidos por teores elevados em cádmio, arsénio e cobre.

Tendo em conta que se fizeram recolhas a diferentes profundidades, é ainda possível compreender qual a variação destes teores nas amostras em profundidade. Assim, e utilizando o elemento claramente mais contaminante na área, o zinco, é possível representar para cada amostra esta variação e comparar com a geomorfologia da área em estudo. Deste modo, nas Figuras 5.7 e 5.8 apresentam-se as amostras relativas à área A0, as amostras relativas à área A1 estão representadas na Figura 5.9, a área A3 e A4 nas Figuras 5.10 e 5.11, respectivamente, e na Figura 5.12 a área A5.

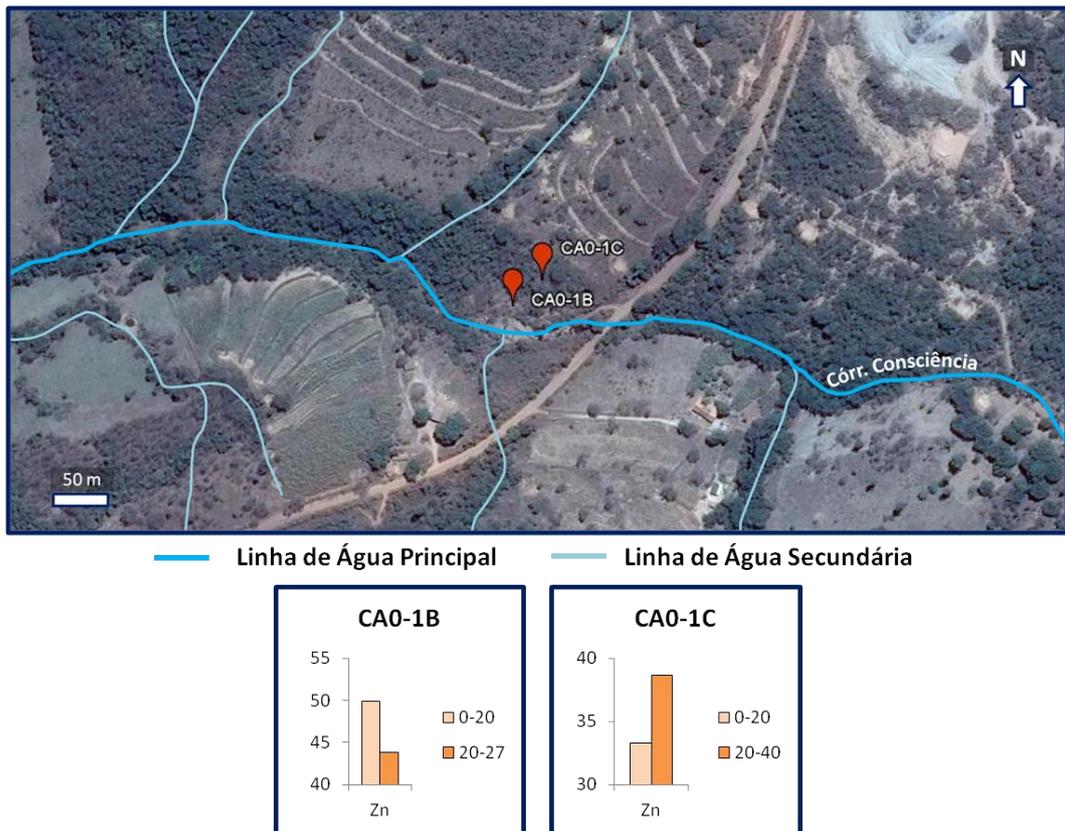


Figura 5.7: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A0 (amostras CA0-1B e CA0-1C).

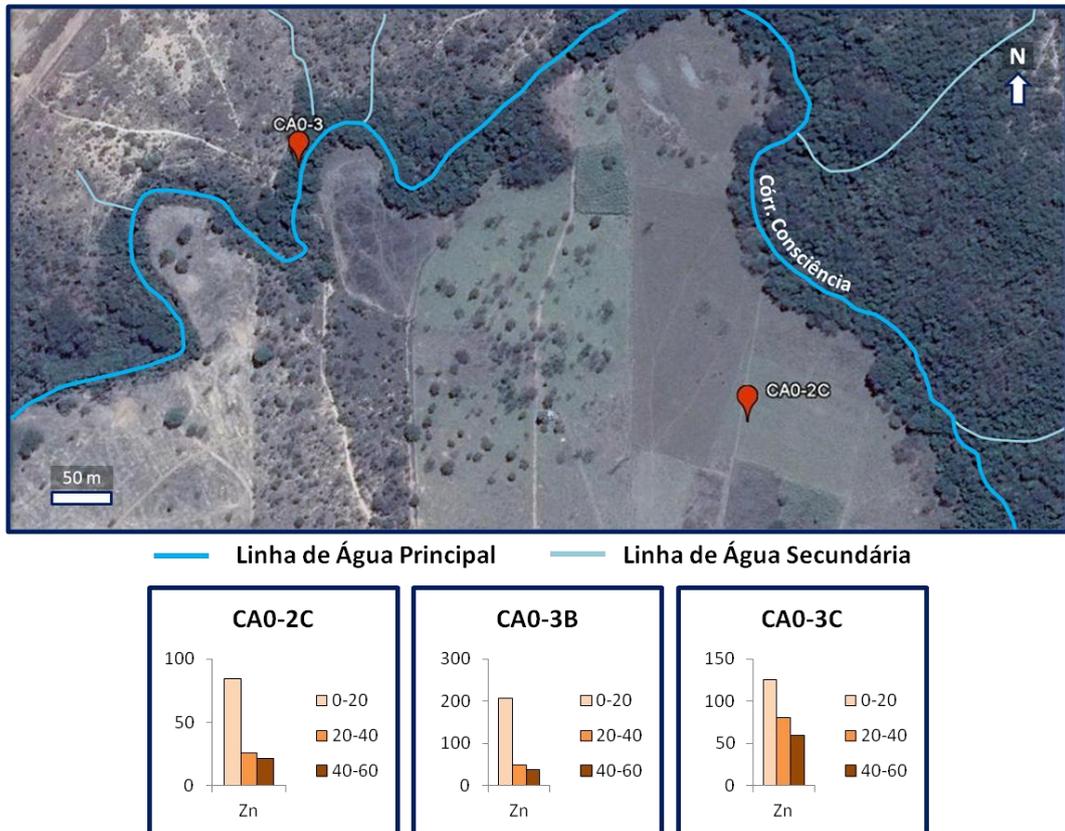


Figura 5.8: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A0 (amostras CA0-2C, CA0-3B e CA0-3C).



— Linha de Água Principal    — Linha de Água Secundária    Planície Aluvionar

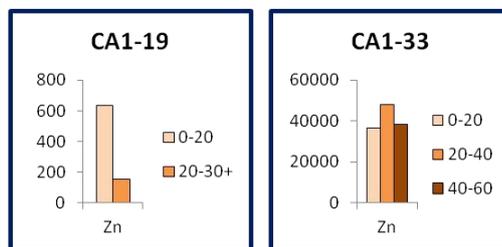


Figura 5.9: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A1.



— Linha de Água Principal    — Linha de Água Secundária    Planície Aluvionar

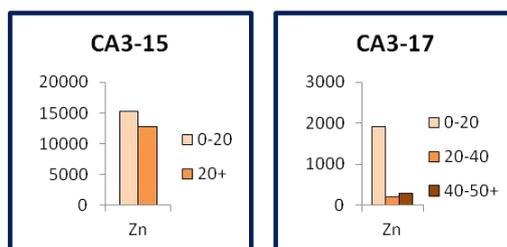


Figura 5.10: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A3.



— Linha de Água Secundária    Zona de Aterro

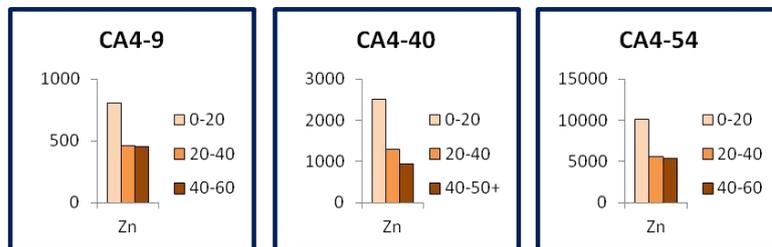


Figura 5.11: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A4.



— Linha de Água Principal    Zona de Aterro

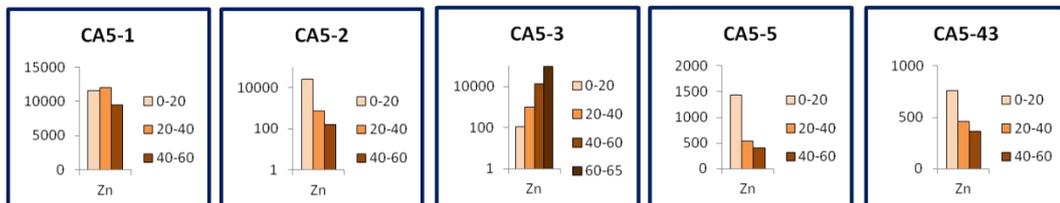


Figura 5.12: Variação em profundidade dos teores de zinco na área A5.

De um modo geral, e de acordo com as Figuras anteriores, observam-se valores superiores à superfície, o que se deverá primeiramente, à localização muito superficial dos antigos depósitos de resíduos (Figura 1.3) alguns deles, como já foi referido, já removidos; e à morfologia do terreno, que se caracteriza por vertentes levemente inclinadas, o que dificulta a infiltração das águas pluviais. Assim, o padrão de contaminação destas zonas deverá corresponder a uma junção destes dois factores, sendo que as fracções mais facilmente mobilizáveis são solubilizadas pelas águas de escorrência durante a estação das chuvas. As antigas zonas de aterro de resíduos identificam-se pelos teores, claramente superiores aos encontrados em amostras mais próximas ao córrego Barreiro Grande (ver Figura 5.12).

No entanto, verificam-se algumas amostras em que os teores em profundidade são superiores aos identificados nas camadas mais superficiais. Este comportamento pode dever-se a pequenas variações de declive, que podem formar pequenas depressões locais, que podem facilitar a infiltração da água, ou à presença de vegetação, que forma uma barreira física à escorrência superficial, levando à infiltração da água (o que poderá ser o caso nas amostras CA5-3, CA5-1 e CA0-1C). No caso da amostra CA1-33, os mais elevados teores em profundidade poderão dever-se à sua localização dentro da planície aluvionar do córrego Consciência, num local preferencial de deposição que recebe o acarreo sedimentar de áreas contaminadas. Deste modo, durante a época das chuvas ocorre a inundação desta zona, o que favorece a infiltração das águas, que lixiviam as camadas mais superficiais e tendem a concentrar os contaminantes nas mais profundas.

### 5.2.2. Factor de Enriquecimento

De forma a mais facilmente ser determinado o grau de contaminação, procedeu-se ao cálculo do Factor de Enriquecimento. Kabata-Pendias (2001) refere o Factor de Enriquecimento como uma razão padronizada com os valores de Clarke para rochas parentais, expressa pela expressão:

$$FE = \frac{VM/P_s}{CC/P_r}$$

Em que, VM representa o valor medido para um dado elemento químico,  $P_s$  representa o valor padrão para o solo, CC o valor de Clarke e  $P_r$ , o valor padrão para a rocha-mãe.

Tendo em conta que o objectivo da determinação deste factor de enriquecimento se prende essencialmente com a comparação com a área A0 e não com possíveis rochas parentais, procedeu-se ao cálculo do factor de enriquecimento segundo Lee *et al.* (1997) (Nude *et al.*, 2011; Pinho, 2013). Este autor calcula o factor de enriquecimento, utilizando o ferro para padronizar as amostras segundo a expressão:

$$FE = \frac{(Me/Fe)_{amostra}}{(Me/Fe)_{padrão}}$$

Em que  $(Me/Fe)_{amostra}$  corresponde à razão entre um determinado elemento metálico e o ferro na amostra e  $(Me/Fe)_{padrão}$  corresponde à razão entre o metal e o ferro no padrão.

Para efeitos de cálculo do factor de enriquecimento, utilizaram-se médias de toda a área A0 em todos os elementos, para eliminar possíveis enriquecimentos pontuais, e procedeu-se ao cálculo, para todas as amostras, do factor de enriquecimento. Estes resultados podem ser agrupados em cinco categorias principais, que se encontram representadas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1: Categorias de classificação do factor de enriquecimento (FE).**  
De Nude *et al.* (2011) e Pinho (2013).

FE	Descrição
< 2	Depleção ou Enriquecimento Mínimo
2-5	Enriquecimento Moderado
5-20	Enriquecimento Significativo
20-40	Enriquecimento Muito Elevado
> 40	Enriquecimento Extremamente Elevado

Os resultados apresentam-se na sua totalidade em Anexo, na Tabela A.23, sendo que na Figura 5.13 se apresentam o número de ocorrências em cada classe, com o objectivo de mais facilmente se identificarem os enriquecimentos dos diferentes elementos em cada área.

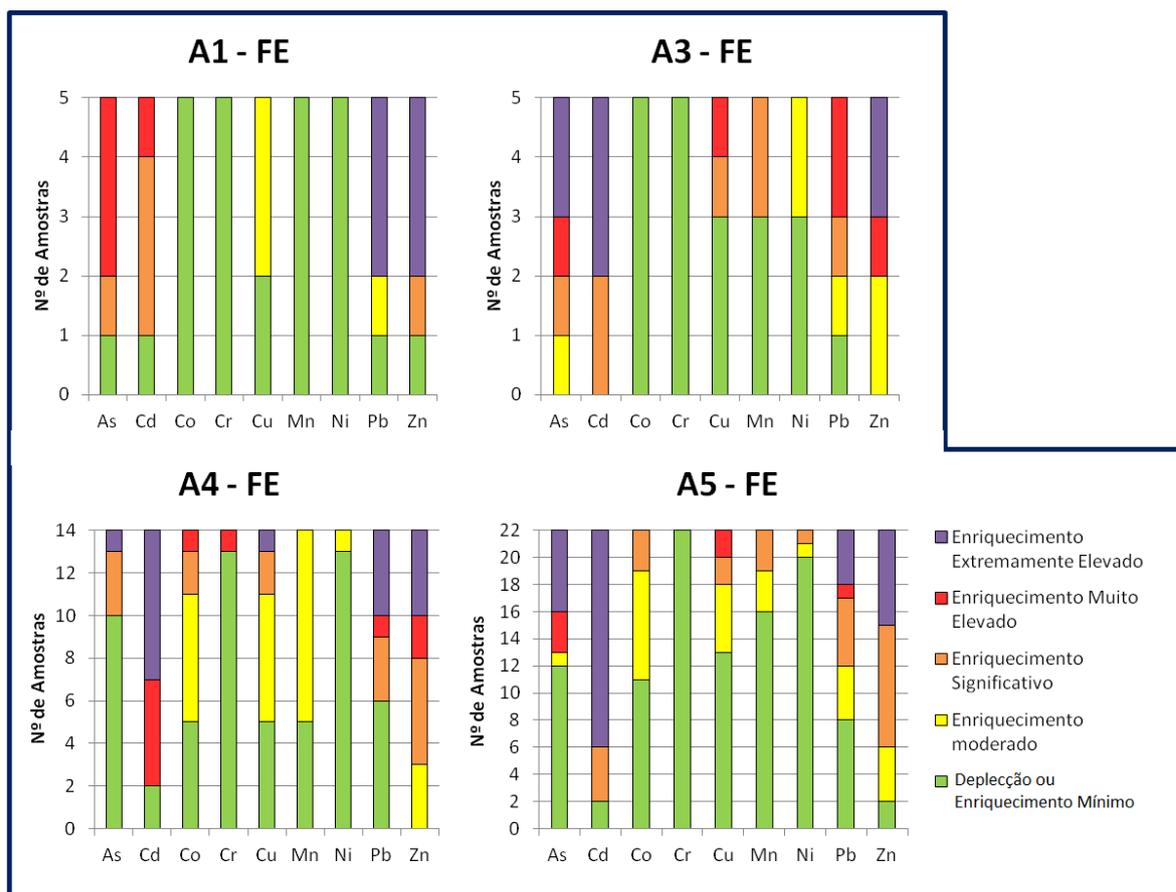


Figura 5.13: Categorias do factor de enriquecimento para os solos da área em estudo.

Deste modo, e de acordo com a Figura anterior e as Figuras 5.14 e 5.15, a área em estudo encontra-se essencialmente enriquecida em cádmio e zinco, verificando-se enriquecimentos muito elevados a extremamente elevados, pontuais, associados ao arsénio (na área A3 e A5, como já foi referido), ao cobre e ao chumbo. Todos os outros elementos encontram-se essencialmente com enriquecimentos mínimos, identificando-se alguns pontos em que se verificam enriquecimentos moderados a significativos em cobalto, manganês e níquel, sendo as áreas A3 e A5 as áreas mais preocupantes.

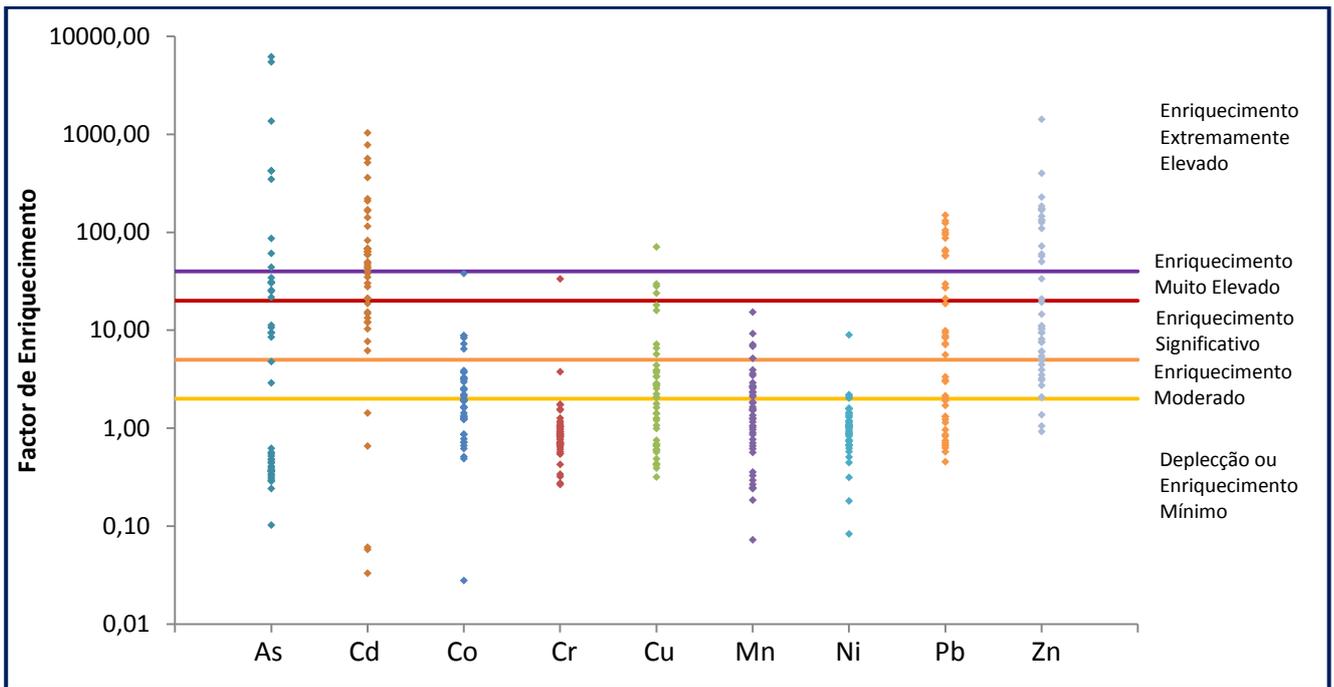


Figura 5.14: Factor de enriquecimento para todos os solos da área em estudo. Valores apresentados em escala logarítmica.

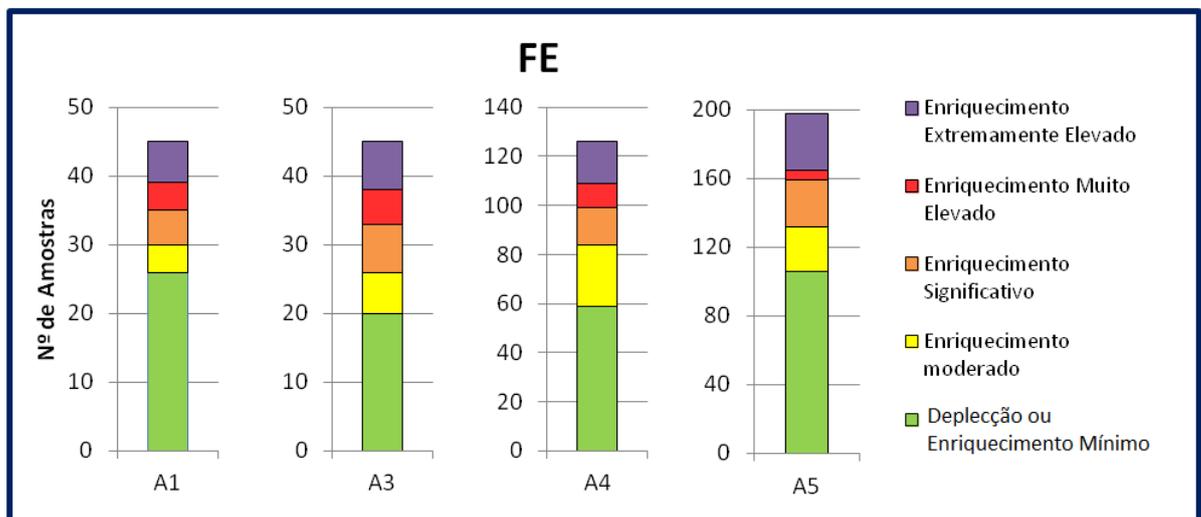


Figura 5.15: Somatório do número de ocorrências em cada categoria do factor de enriquecimento.

### 5.2.3. Índice de Geoacumulação

Kabata-Pendias (2001) refere ainda o Índice de Geoacumulação (IGL – *Index of Geochemical Load*), um índice que permite calcular, tendo como base uma referência local (um *background*), a “carga geoquímica” de um dado elemento numa amostra, segundo a expressão (Kabata-Pendias, 2001; Trindade, 2010; Nude *et al.*, 2011; Trindade *et al.*, 2012):

$$IGL = \log_2 \left( \frac{VM}{VP \times 1,5} \right)$$

Em que VM representa o valor medido num dado elemento e VP o valor padrão desse elemento.

Deste modo, procedeu-se ao cálculo deste índice para todas amostras cujos resultados se encontram em Anexo, na Tabela A.24, utilizando como valor padrão o valor médio para cada elemento da área A0. Na Tabela 5.2 apresentam-se as categorias referentes ao Índice de Geoacumulação.

Tabela 5.2: Categorias de classificação do Índice de Geoacumulação (IGL).  
De Trindade (2010), Nude *et al.* (2011) e Trindade *et al.* (2012)

IGL	Descrição
< 0	Não Contaminado
0-1	Não Contaminado a Moderadamente Contaminado
1-2	Moderadamente Contaminado
2-3	Moderadamente a Altamente Contaminado
3-4	Altamente Contaminado
4-5	Altamente a Extremamente Contaminado
> 5	Extremamente Contaminado

Na Figura 5.16 representam-se o número de ocorrências em cada classe para os diferentes elementos, enquanto que na Figura 5.17 se apresentam os valores de acordo com a sua categoria, de forma a mais facilmente compreendermos quais os mais contaminantes. Por sua vez, a Figura 5.18 representa o somatório de todas as classes em todos os elementos, de modo a complementar a análise das figuras anteriores.

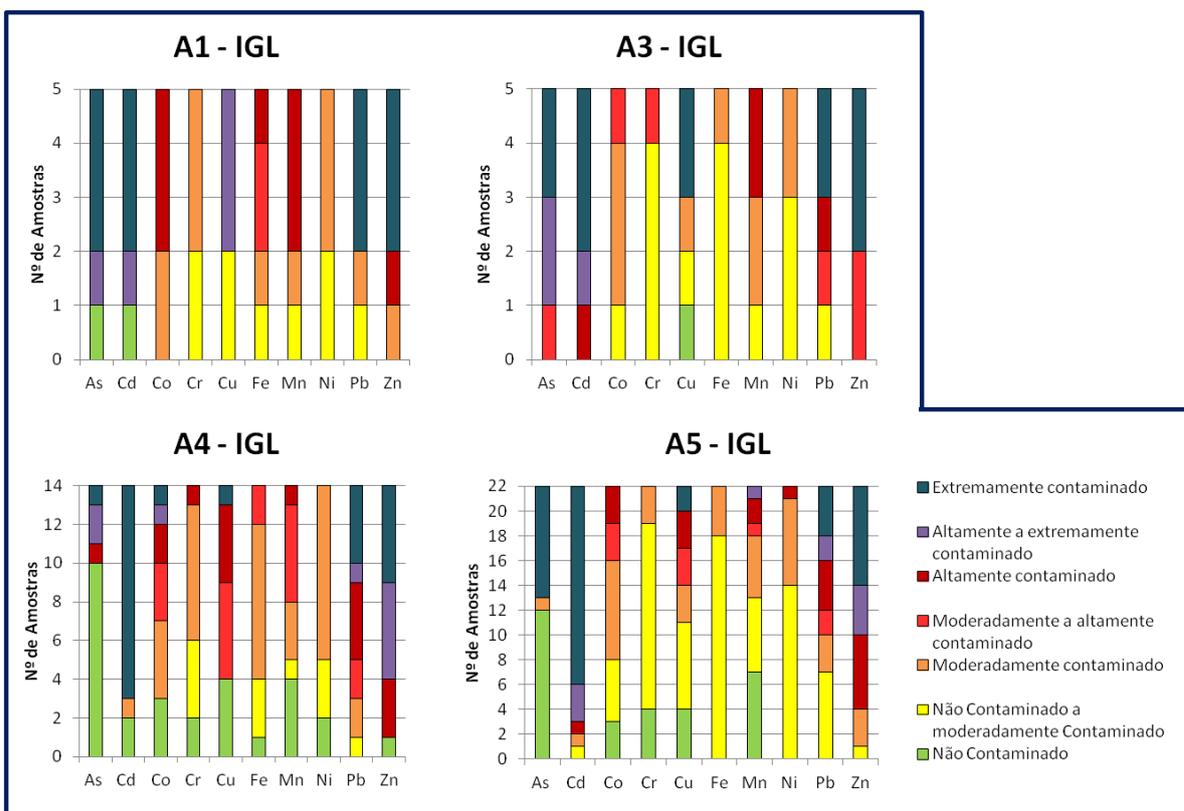


Figura 5.16: Categorias do Índice de Geoacumulação nos solos da área em estudo.

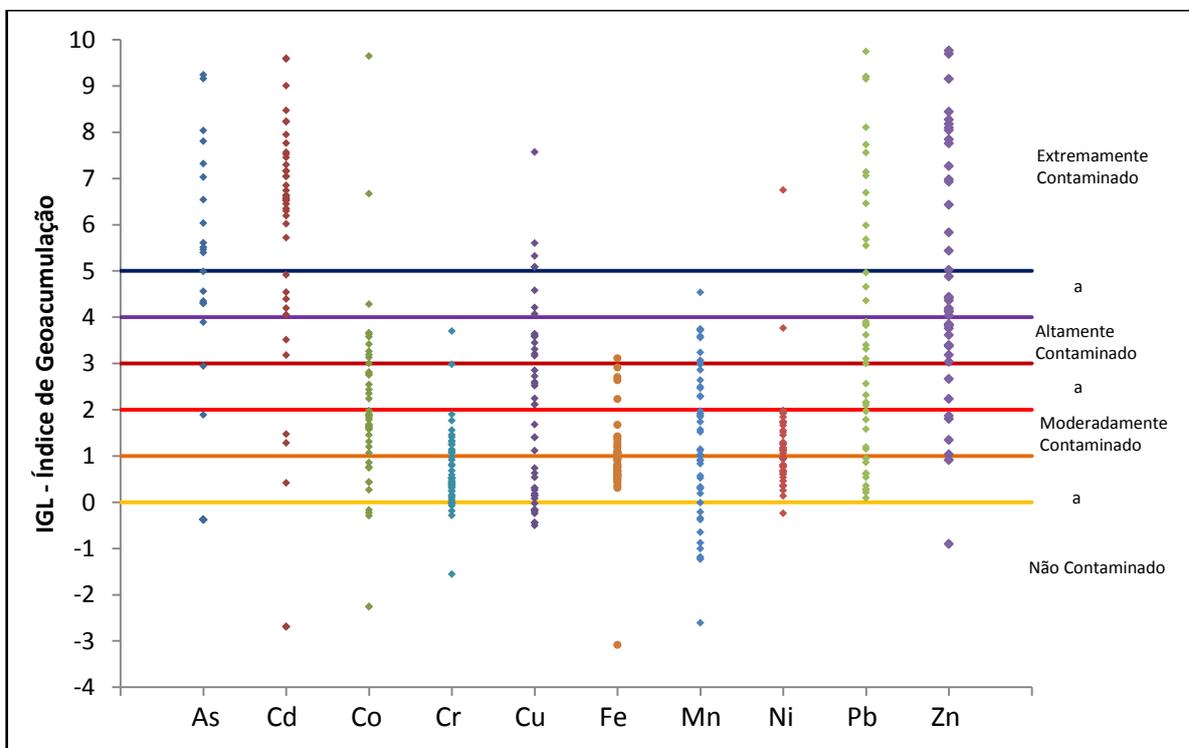


Figura 5.17: Índice de Geoacumulação para os solos da área em estudo.

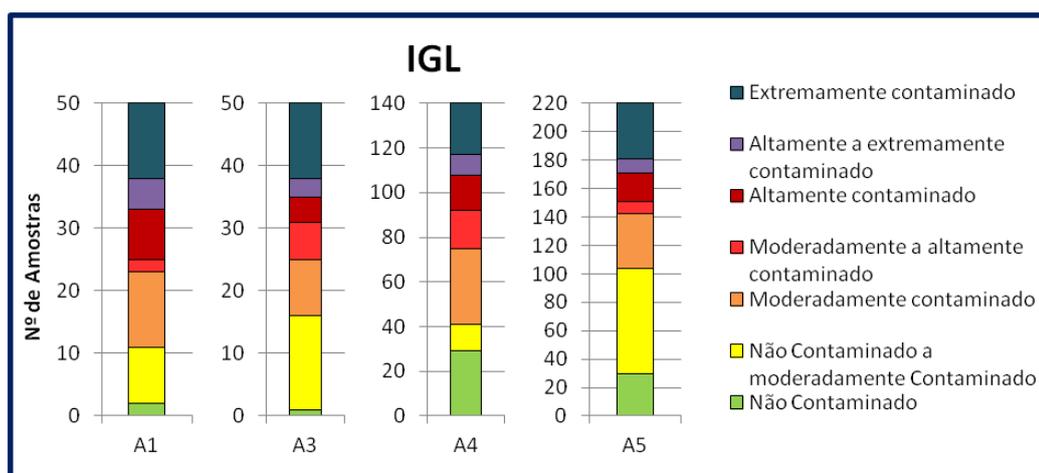


Figura 5.18: Somatório do número de ocorrências em cada categoria do Índice de Geoacumulação (IGL).

De acordo com as Figuras anteriores identificam-se o arsénio, o cádmio, o chumbo e o zinco como os elementos mais contaminantes na área, apresentando valores médios que correspondem a teores altamente a extremamente contaminados nestes elementos. Seguidamente destaca-se o cobre e, em menor escala, o cobalto e o manganês, apresentando valores que correspondem a teores moderadamente a altamente contaminados. Com valores em média não contaminados a moderadamente contaminados distinguem-se elementos como o crómio, o ferro e o níquel.

Comparando com o factor de enriquecimento, o índice de geoacumulação apresenta valores ligeiramente mais elevados, o que se deverá ao facto de possuir um maior número de classes e, portanto, ser um índice mais exacto.

#### 5.2.4. Factor de Contaminação

Nude *et al.* (2011) refere ainda o factor de contaminação. O factor de contaminação é utilizado para calcular o Índice de Poluição, no entanto, por si só dá uma rápida e simples aproximação ao nível de contaminação de uma determinada área. Assim, o factor de contaminação (FC) pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$FC = \frac{VM}{VRef}$$

Em que VM corresponde à média de valores medidos num determinado elemento, nunca inferior a cinco, de modo a eliminar picos pontuais de contaminação e VRef corresponde ao valor de referência.

Para determinar o factor de contaminação, procedeu-se ao cálculo por áreas, sendo o valor de referência correspondente à média das concentrações, para cada elemento, na área A0. Os valores encontram-se representados na Tabela 5.3, e as respectivas categorias na Tabela 5.4.

Tabela 5.3: Factores de contaminação nos principais elementos metálicos nos solos da área em estudo.

	Factor de Contaminação			
	Área A1	Área A3	Área A4	Área A5
As	89,13	2811,51	5,24	111,94
Cd	49,52	463,68	72,03	1441,60
Co	4,57	2,10	8,47	2,57
Cr	1,46	1,77	1,94	0,91
Cu	8,23	11,65	12,55	4,42
Fe	3,45	1,17	1,68	1,15
Mn	5,13	4,31	2,43	2,37
Ni	1,95	1,71	1,43	1,57
Pb	269,88	16,04	33,07	22,05
Zn	374,72	92,39	39,61	123,39

Tabela 5.4: Categorias de classificação do factor de contaminação (FC).  
De Nude *et al.* (2011).

FC	Descrição
< 1	Nível baixo de contaminação
1-3	Nível moderado de contaminação
3-6	Nível considerável de contaminação
> 6	Nível elevado de contaminação

Tendo em conta a Tabela 5.3, são facilmente identificáveis os elementos mais preocupantes, nomeadamente o cádmio, o chumbo e o zinco, seguido pelo arsénio e cobre, sendo o crómio e o níquel os elementos menos contaminantes na área em estudo. Atendendo às classificações determinadas para cada elemento nas diferentes áreas, é a área A1 a mais problemática, apresentando níveis elevados de contaminação em cinco elementos, e para três elementos níveis consideráveis de contaminação, seguida das áreas A3 e A4. A área A5 apresenta um menor número

de elementos com níveis elevados de contaminação, no entanto, é aqui que se encontra o valor mais elevado para o factor de contaminação em cádmio.

Comparando com os restantes índices de classificação da contaminação, o factor de contaminação permite, muito facilmente identificar os principais contaminantes na área, embora de uma forma muito menos detalhada que o Índice de Geoacumulação ou o Factor de Enriquecimento.

### 5.3. Parâmetros Físico-Químicos

Para determinar se existe uma relação entre o pH do solo e o grau de contaminação em diversos elementos metálicos, apresenta-se na Figura 5.19, a comparação entre os valores de pH obtidos para cada amostra e os respectivos resultados para o Índice de Geoacumulação para os elementos que se demonstram como os mais altamente contaminantes na área, o cádmio e o zinco.

Assim, e de acordo com a Figura 5.19, é possível correlacionar estes valores, uma vez que quando se verifica uma diminuição do pH, também os níveis de contaminação tendem a diminuir (como se observa na área A3 nas amostras CA3-17, ou na área A4 nas amostras CA4-41), assim como quando se verificam amostras com mais elevadas contaminações, também se identificam pequenos picos de aumento de pH, como é notório na amostra CA5-42.

Estes resultados não seriam os esperados, especialmente em áreas em que existem sulfuretos, uma vez que à sua oxidação se associam valores de pH muito baixos (Salomons, 1995). No entanto estes valores elevados de pH poderão relacionar-se com o facto de já se terem realizado correcções nos solos da área (correcções de pH e de fertilidade) na tentativa de implementação de fitorremediação na área (França, 2011).

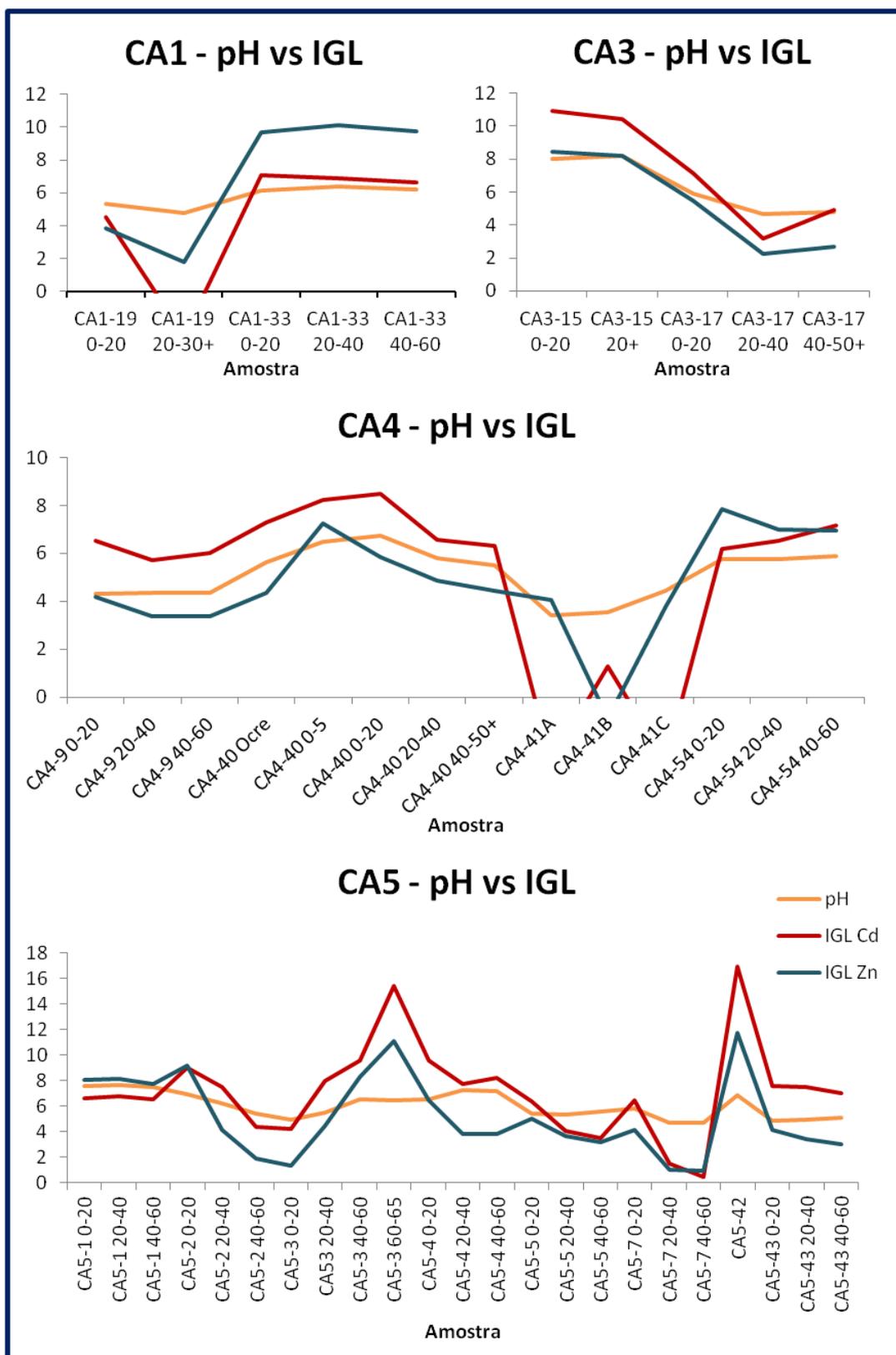


Figura 5.19: Comparação dos valores de pH com o Índice de Geoacumulação (IGL) calculado, para todas as amostras de solo das áreas A1, A3, A4 e A5.

O pH é, no entanto, um indicador de fertilidade do solo, pois os seus valores facilitam ou dificultam a absorção de determinados nutrientes pelas plantas, sendo os teores óptimos para uso agrícola entre 5,5 e 7 (Brady & Weil *in* Brown, 2011). Deste modo, a Figura 5.20, procura ilustrar que solos, na área em estudo, possuem estes teores.

Assim, vemos que muitas das amostras se encontram dentro do intervalo de pH óptimo, apresentando em alguns casos, valores acima do Limite Superior (acima de pH 7), o que não seria de esperar tendo em conta as características ácidas dos solos do tipo Latossolo (aproximadamente 4,5 (Agência Embrapa de Informação Tecnológica)). Estes valores, embora possam facilitar a solubilização de certos elementos nutritivos, não são certamente valores naturais da região, sendo provavelmente resultantes de acções antrópicas na área industrial da Votorantim através de, por exemplo aplicação de correctores no solo, em anteriores ensaios-piloto de fitorremediação na área (França, 2011).

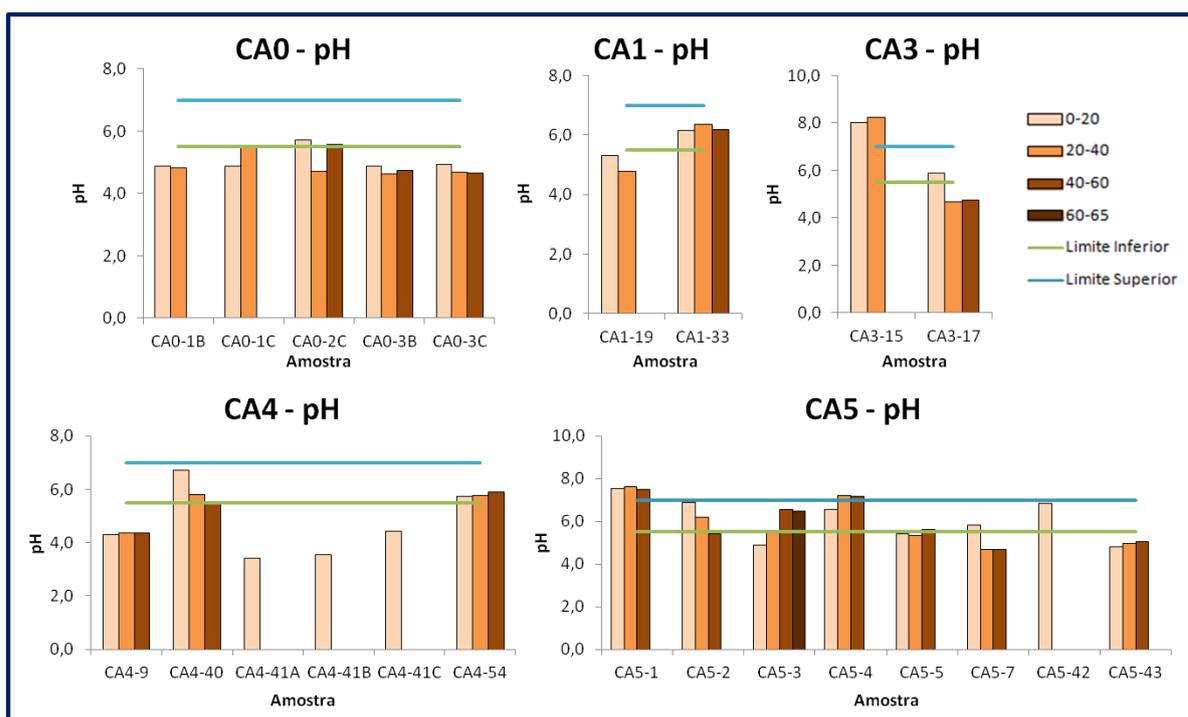


Figura 5.20: Comparação dos valores de pH com os valores óptimos para uso agrícola (Brady & Weil *in* Brown, 2011).

## 5.4. Extracção Sequencial

Como já foi referido, a extracção sequencial é uma óptima forma de quantificar a mobilidade e, conseqüentemente, avaliar a perigosidade ambiental dos elementos mais contaminantes nas amostras, pois permite o fraccionamento dos teores dos elementos extraídos pela digestão parcial em formas mais e menos estáveis.

Deste modo, apresentam-se nas Figuras 5.21 e 5.22, sob a forma de percentagem, as fracções extraídas, para cada uma das amostras em que se realizou extracção sequencial e para cada um dos elementos analisados, de forma a facilitar a determinação dos elementos que se encontram em fracções mais facilmente solubilizáveis e os que, pelo contrário, se concentram essencialmente em fases mais estáveis constituindo, portanto, elementos menos problemáticos no meio.

Assim, e de acordo com as Figuras 5.21 e 5.22, é possível de uma forma breve verificar que:

- O cádmio e o zinco ocorrem essencialmente associados às fracções mais lábeis, podendo ainda ocorrer, em menor escala, associados a óxidos de manganês;
- O cobalto ocorre associado a óxidos de manganês e de ferro, quer na sua forma cristalina, quer na sua forma amorfa;
- O crómio encontra-se essencialmente associado a óxidos de ferro cristalino, podendo ainda, em alguns locais, se associar a sulfuretos e, a menor escala, a óxidos de ferro amorfos;
- O cobre, assim como o chumbo, apresentam-se quer nas formas mais lábeis, na forma solúvel ou associados a óxidos de manganês, quer em fracções mais estáveis, associados a óxidos de ferro cristalinos;
- O ferro ocorre sob a forma de óxido, apresentando-se essencialmente na forma cristalina;
- O manganês encontra-se sob a forma de óxido, podendo ainda localmente apresentar-se associado a óxidos de ferro cristalinos;
- O níquel associa-se essencialmente a óxidos de ferro, quer na sua forma cristalina, quer amorfa, apresentando-se ainda, em menor escala, associado às fracções mais lábeis, ocorrendo quer na forma solúvel, quer associado a óxidos de manganês.

Estes resultados poderão ser explicados tendo em conta:

- A natureza do minério utilizado na unidade industrial de Três Marias e a sua proveniência, o que permite compreender as elevadas concentrações de cádmio e zinco nas fracções mais lábeis;
- A existência de antigos depósitos de resíduos sobre os solos da área, o que permite identificar o carácter pontual de fases mais solúveis de cobre, níquel e chumbo;
- A geologia e a mineralogia associada às formações geológicas que constituem a área, nomeadamente no que diz respeito à presença do ferro na forma de óxido cristalino.

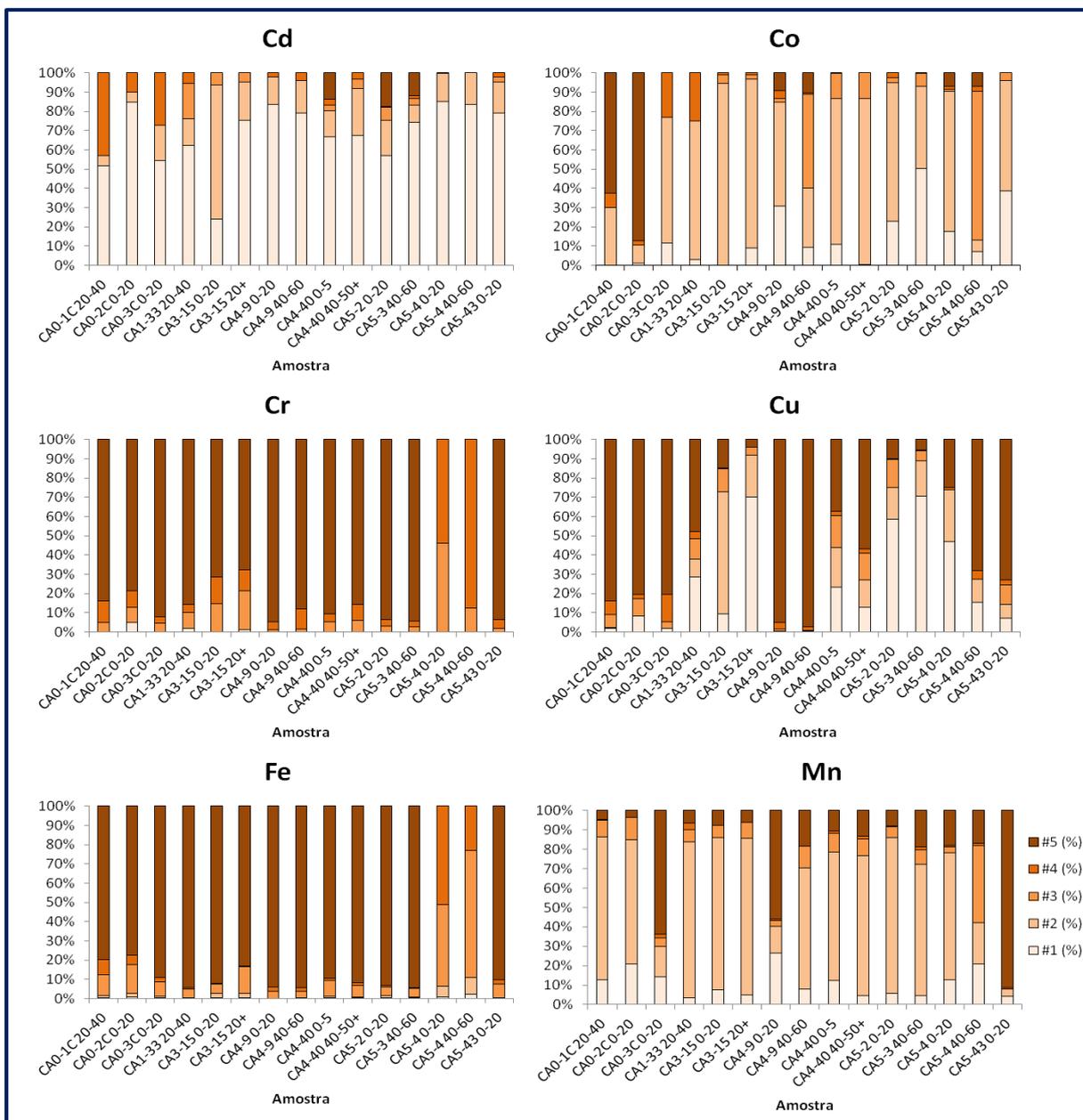


Figura 5.21: Fracções extraídas em cada uma das fases da extração sequencial, para o cádmio, crómio, cobre, ferro e manganês. #1: fracção solúvel e ligada a carbonatos; #2: fracção ligada a óxidos de manganês; #3: fracção ligada a óxidos de ferro amorfos; #4: fracção ligada a material orgânico e parcialmente a sulfuretos; #5: fracção ligada a óxidos de ferro cristalinos.

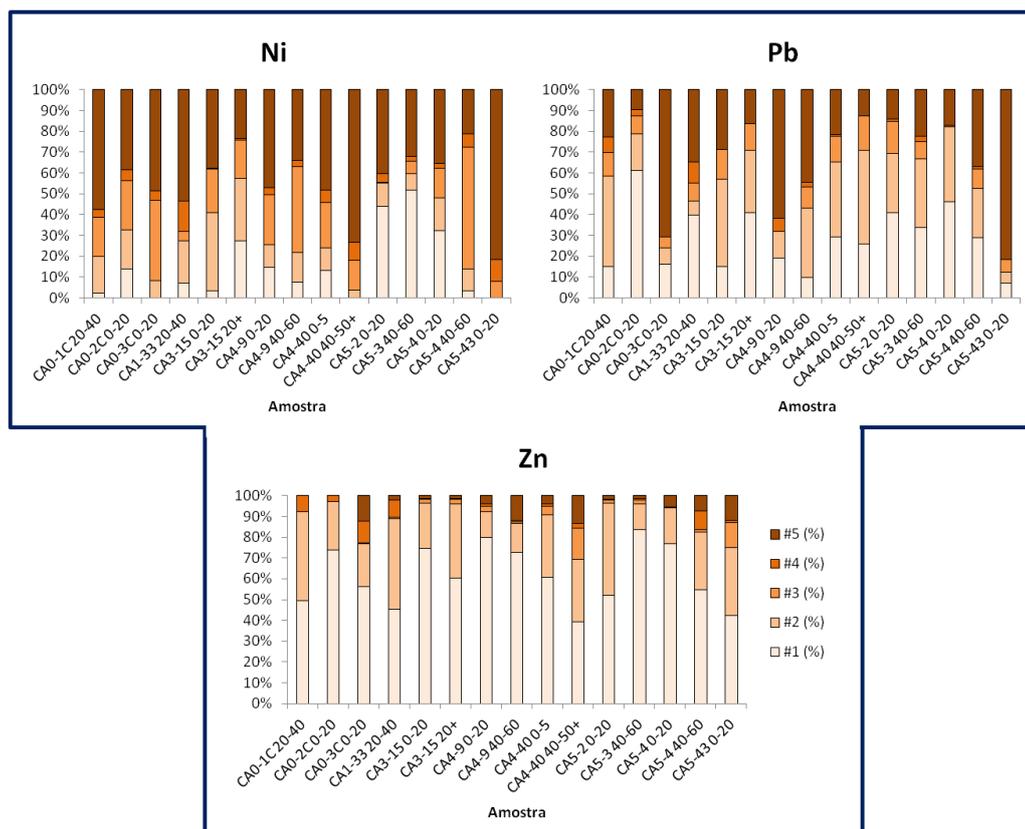


Figura 5.22: Fracções extraídas para cada uma das fases de extracção sequencial, para o níquel, chumbo e zinco.  
 #1: fracção solúvel e ligada a carbonatos; #2: fracção ligada a óxidos de manganês; #3: fracção ligada a óxidos de ferro amorfos;  
 #4: fracção ligada a material orgânico e parcialmente a sulfuretos; #5: fracção ligada a óxidos de ferro cristalinos.

De forma a compreender a perigosidade dos metais na fracção mais solúvel, os valores obtidos a partir da extracção por acetato de amónio (#1) e que representam as formas mais lábeis de cada elemento (existentes na fase aquosa, como catiões de troca e ligados a carbonatos) foram comparados com os níveis presentes de referência locais (COPAM, 2011; CONAMA, 2012). Tendo a noção que os valores que se encontram legislados não são para esta fracção mas para o conjunto de todas as formas extraíveis (obtidas a partir da digestão com *aqua regia*), esta é uma forma rápida de depreender o grau de perigosidade que os metais analisados têm para o ambiente. Esta comparação encontra-se representada na Figura 5.23.

A Figura 5.23 permite-nos identificar e comprovar mais uma vez que os principais contaminantes e os de maior perigosidade ambiental correspondem ao cádmio e ao zinco, sendo estes os que apresentam teores mais elevados da fracção mais lábil na maioria das amostras relativamente aos limites propostos para o total de todas as fracções extraíveis. O cobre e o chumbo correspondem a contaminantes de carácter pontual, encontrando-se as concentrações mais elevadas da sua forma mais solúvel essencialmente nas áreas onde existiam os antigos

depósitos (Figura 1.3), excetuando a amostra CA1-33 (para o chumbo) cuja contaminação se deverá associar à sua localização na planície aluvionar, onde se concentram a maior parte dos materiais lixiviados da área industrial.

O cobalto, o crómio e o níquel encontram-se maioritariamente associados a outras fases minerais, mais estáveis, não representando um perigo ambiental tão elevado como as restantes elementos.

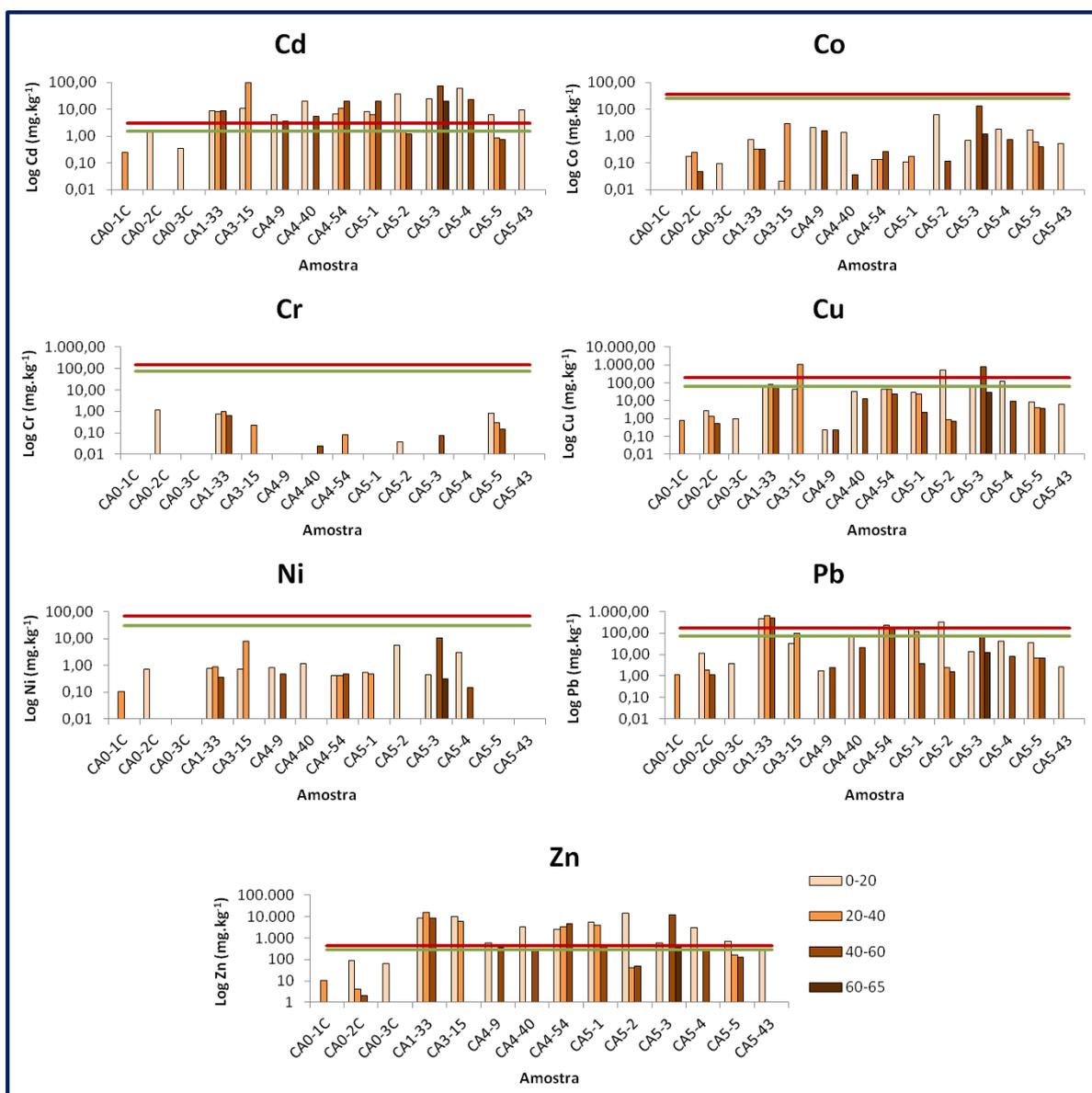


Figura 5.23: Comparação dos teores obtidos na primeira fase de extração sequencial com os limites legislados do somatório de todas as frações extraíveis, para os solos (COPAM, 2011; CONAMA, 2012). A verde encontram-se marcados os valores de prevenção (VP) e a vermelho os valores de investigação agrícola (VI Agrícola), para cada elemento.

É ainda importante salientar o facto de se estar a proceder a uma comparação entre uma fracção muito solúvel, como é a extraída por acetato de amónio, com valores referenciados para fracções extraídas pelo método da *aqua regia*, que consiste no conjunto de fracções ligadas a compostos orgânicos e minerais, excluindo os silicatos. Tendo em conta este facto, verificam-se excedências dos valores legislados em muitos elementos químicos, como é o caso do cádmio, do cobre, do chumbo e do zinco, o que revela um severo grau de contaminação da área em estudo e uma necessidade urgente de remediação destes solos.

## 5.5. Análise Elementar de CHNS

### 5.5.1. Carbono

Nos solos, o carbono pode ocorrer sob duas formas distintas: orgânica (resultado da deposição e decomposição de material orgânico) e inorgânica (associada essencialmente a carbonatos). A análise elementar deste elemento permitiu assim determinar a percentagem de carbono total presente nas amostras que, tendo em conta a mineralogia relativa à formação geológica de Três Marias, deverá estar associado essencialmente à fracção orgânica.

A Figura 5.24 apresenta assim os teores analisados nas amostras de solos da área em estudo, assim como a sua variação em profundidade. É assim possível identificar concentrações relativamente baixas e cujas percentagens tendem a diminuir em profundidade. Este facto poderá relacionar-se com a maior fracção orgânica presente nas camadas superficiais de solo, resultantes essencialmente da deposição e decomposição de matéria orgânica.

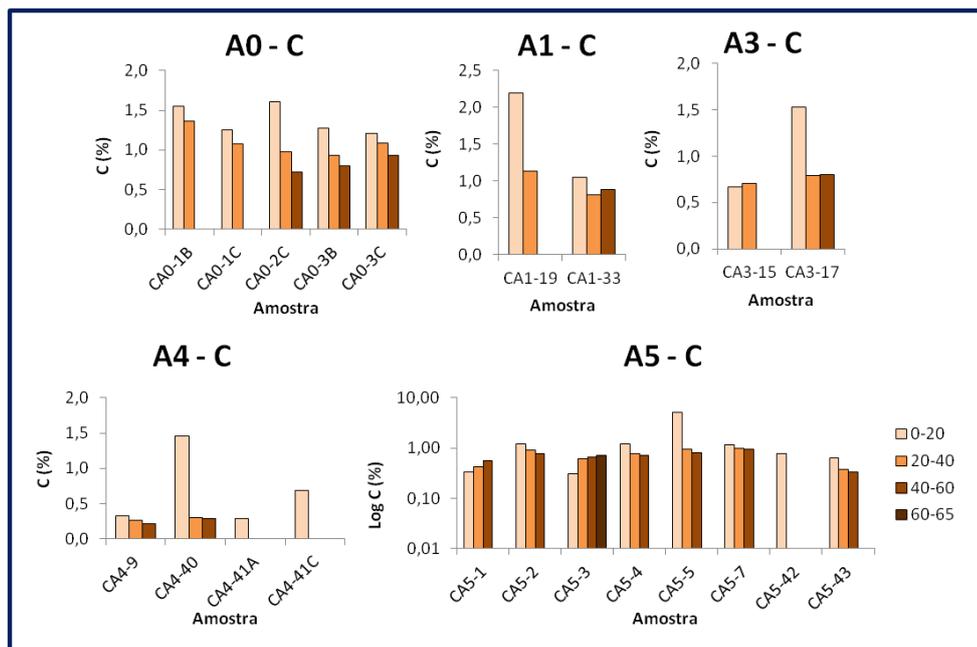


Figura 5.24: Percentagens de carbono obtidas para as amostras de solos.

### 5.5.2. Azoto

A compreensão e determinação da quantidade de azoto presente num solo é de enorme importância uma vez que este é um dos principais nutrientes para as plantas. No entanto, a sua dinâmica no solo é bastante complexa (Figura 5.25) uma vez que existem inúmeros factores que afectam os níveis de azoto inorgânico disponível (Roy *et al.*, 2006).

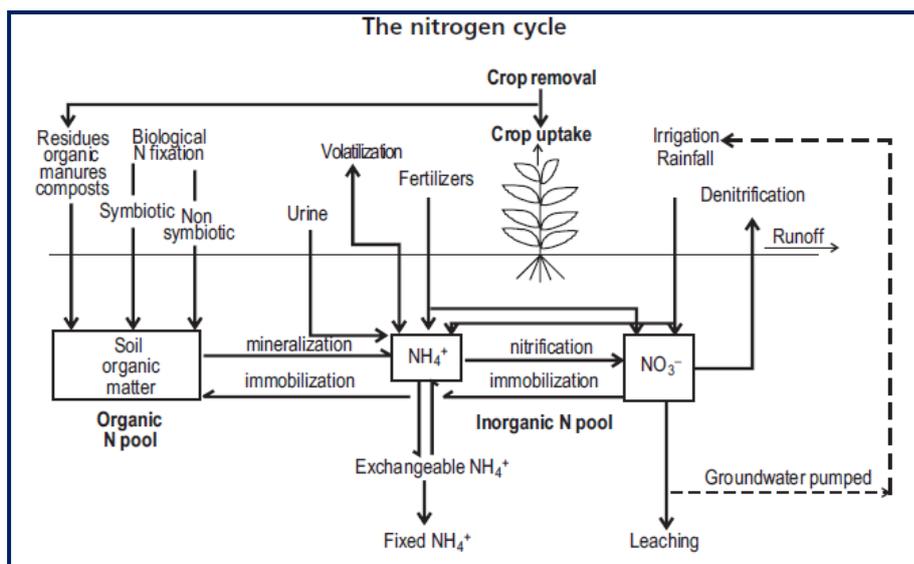


Figura 5.25: Dinâmica do azoto no solo. De Roy *et al.* (2006).

No solo, o azoto encontra-se essencialmente sob a forma orgânica, sendo o resultado da decomposição de matéria orgânica. Por esta razão, a maior concentração deste elemento encontra-se nas zonas mais superficiais do solo. No entanto, é sob a forma inorgânica que as plantas essencialmente captam este elemento, especialmente sob a forma de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ , o que representa cerca de 5% do azoto total do solo (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006). Desta forma, tendo em conta que esta análise representa o azoto total nas amostras, estes valores são puramente indicadores dos valores que poderão estar presentes nestes solos, assim como a sua variação em profundidade (Figura 5.26).

Deste modo, e de acordo com a Figura 5.26, verifica-se como já era esperado, que na maioria das amostras são as camadas superiores (0-20 cm) que apresentam maiores teores de azoto, especialmente nas áreas A0, A1, A3 e A4. Por sua vez, a área A5 apresenta maiores teores de azoto em profundidade, o que poderá relacionar-se com os aterros de resíduos que foram realizados nesta área. Esses resíduos, obviamente mais pobres em nutrientes, encontram-se misturados nas camadas superiores de solo, podendo encontrar-se a maior profundidade as camadas superficiais anteriores à deposição dos resíduos, com maiores teores em azoto.

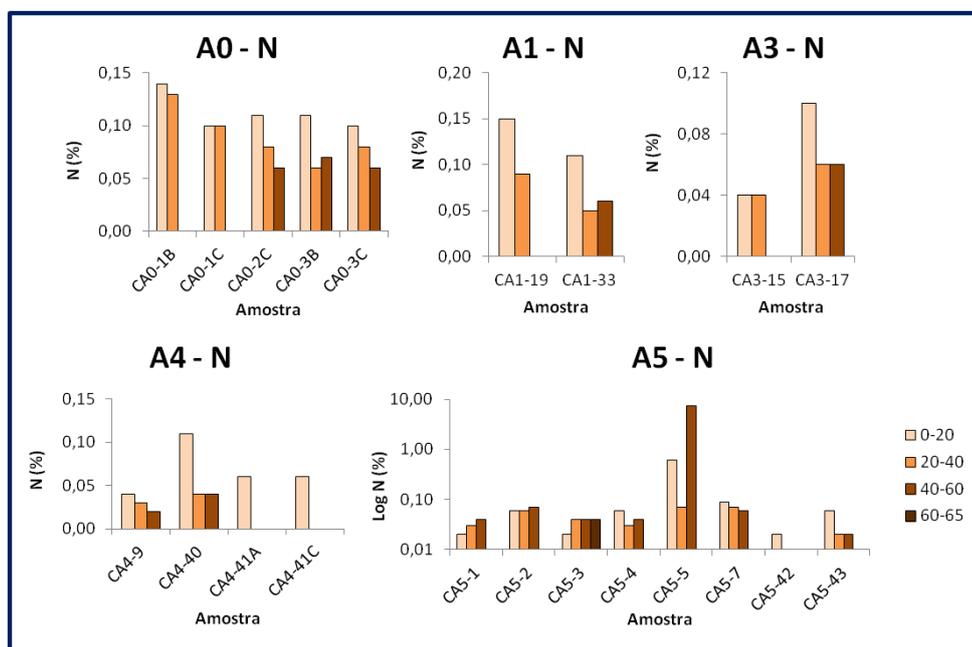


Figura 5.26: Percentagens de azoto obtidas para as amostras de solos.

### 5.5.3. Enxofre

Nos solos o enxofre ocorre sob a forma orgânica e inorgânica, sendo possível descrever a dinâmica deste elemento conforme expresso na Figura 5.27. Nos solos, o enxofre inorgânico ocorre essencialmente sob a forma de sulfatos, que podem estar solúveis ou adsorvidos em colóides, sendo por isso uma fracção facilmente extraível. Em climas tropicais, porém, a sua concentração tende a diminuir quando em comparação com regiões temperadas, o que se deve à menor quantidade de material orgânico no solo, assim como a sua maior velocidade de decomposição. Valores típicos em ambientes tropicais rondam os 106 mg/kg de enxofre (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

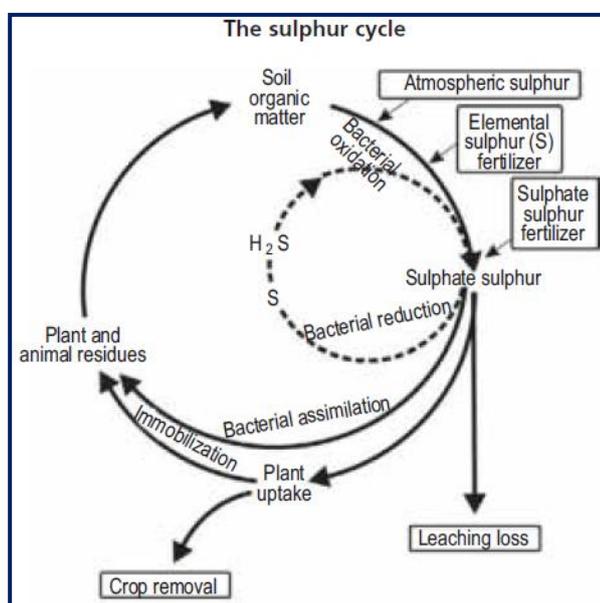


Figura 5.27: Dinâmica do enxofre no solo.  
De Roy *et al.* (2006).

Na área em estudo, a determinação da percentagem de enxofre nos solos é muito importante e prende-se essencialmente à tipologia de minério utilizada na unidade industrial de Três Marias. Sabendo que parte deste material é de origem sulfuretada, esperar-se-ão resultados superiores aos referidos na bibliografia, especialmente tendo presente o potencial de oxidação/redução tipicamente oxidante dos solos, o que torna estes materiais ainda mais solúveis. Por esta razão apresentam-se seguidamente, na Figura 5.28, os teores analisados em enxofre nos solos da área, assim como a sua variação em profundidade.

De uma forma geral, observam-se valores claramente superiores aos 106 mg/kg referidos por Roy *et al.* (2006), identificando-se um enriquecimento em enxofre em profundidade. Este aumento em profundidade dos teores podem ser explicados pela alta solubilidade dos sulfatos e a infiltração até níveis mais profundos, onde tenderão a precipitar. Verificam-se ainda os teores mais elevados nas amostras CA4-41A e CA5-42, que correspondem, respectivamente, a uma antiga zona de aterro de resíduos e a uma amostragem de sulfatos à superfície.

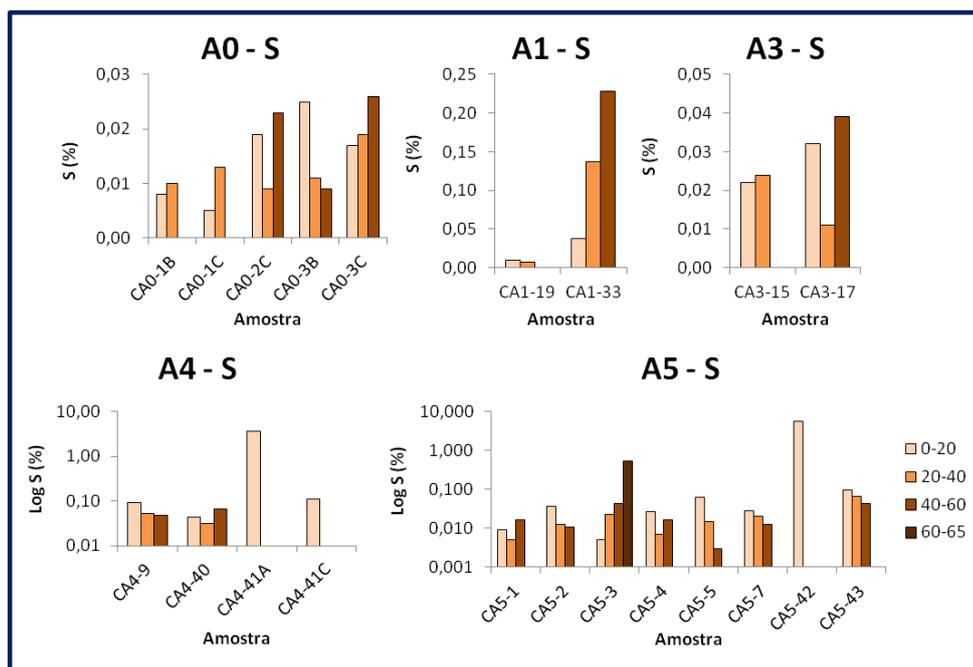


Figura 5.28: Percentagens de enxofre obtidas para as amostras de solos.

### 5.5.4. Índice C/N

Os teores obtidos na análise elementar permitiram ainda o cálculo do Índice C/N. Este índice permite relacionar os teores totais de carbono e azoto, indicando o valor que, em solos não excessivamente esgotados, mais influencia a sua vida microbiana (Setzer, 1941). O mesmo autor refere ainda que valores mais elevados levam à actividade dos microorganismos do solo, podendo estes consumir todo o azoto e impedindo um bom desenvolvimento das plantas. Por outro lado, valores baixos do Índice C/N podem afectar a vida microbiana, de modo que os microorganismos deixem de agir beneficemente na preparação dos nitratos necessários ao desenvolvimento das espécies vegetais.

Deste modo, e de forma a compreender se os solos da área em estudo possuem boas condições para a implementação de espécies vegetais, procedeu-se, como se apresenta na Figura 5.29, à comparação dos resultados obtidos do Índice C/N nos solos com os valores óptimos (entre 8 e 15) explicitados por Brady & Weil *in* Brown (2011).

Assim, e de acordo com a Figura 5.29, observa-se que na maioria das áreas, os solos encontram-se dentro dos valores óptimos para o Índice C/N, verificando-se que na área A5 algumas das amostras apresentam índices muito elevados. Estes valores podem relacionar-se com teores em azoto muito baixos que, como já foi referido, se poderá relacionar com a existência de resíduos minerais nestes solos.

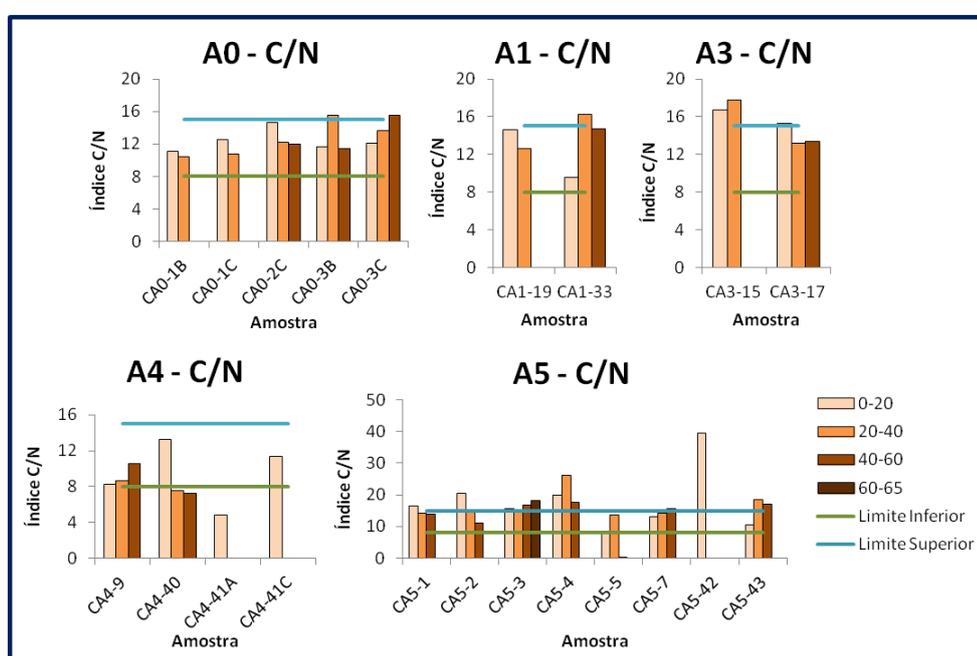


Figura 5.29: Comparação dos valores obtidos para os solos da área em estudo para Índice C/N com o nível óptimo de Brady & Weil *in* Brown (2011), definido pelos limites inferior e superior.

## 5.6. Ensaios de Lixiviação

A realização dos ensaios de lixiviação teve como principal objectivo a determinação, dentro da fracção solúvel, da fase mobilizada por agitação com água, de forma a simular o efeito da água da chuva no local. Assim, e tendo identificado o cádmio e o zinco como os principais contaminantes dos solos, especialmente associados às fracções solúveis, priorizou-se a representação dos dados, ao longo de todo o ensaio, para estes elementos, de forma a compreender a sua solubilidade em água durante o ensaio. Deste modo, o cádmio encontra-se representado na Figura 5.30 e o zinco encontra-se na Figura 5.31.

Comparando os teores lixiviados de cádmio, ao longo das quarenta e oito horas de agitação, é possível observar que muitas das amostras atingem picos máximos de concentração extraída às dezoito horas, diminuindo às vinte e quatro horas e mantendo-se mais ou menos constante até ao final do ensaio. Deste modo, para estes solos são necessárias vinte e quatro horas de agitação para que o solo atinja o equilíbrio com a água. Verifica-se ainda que as amostras que apresentam teores lixiviados superiores ao Valor de Investigação Agrícola (COPAM, 2011; CONAMA, 2012) são a amostra CA4-9 (0-20 cm) e a amostra CA5-3, a todas as profundidades, aumentando os teores lixiviados com a profundidade.

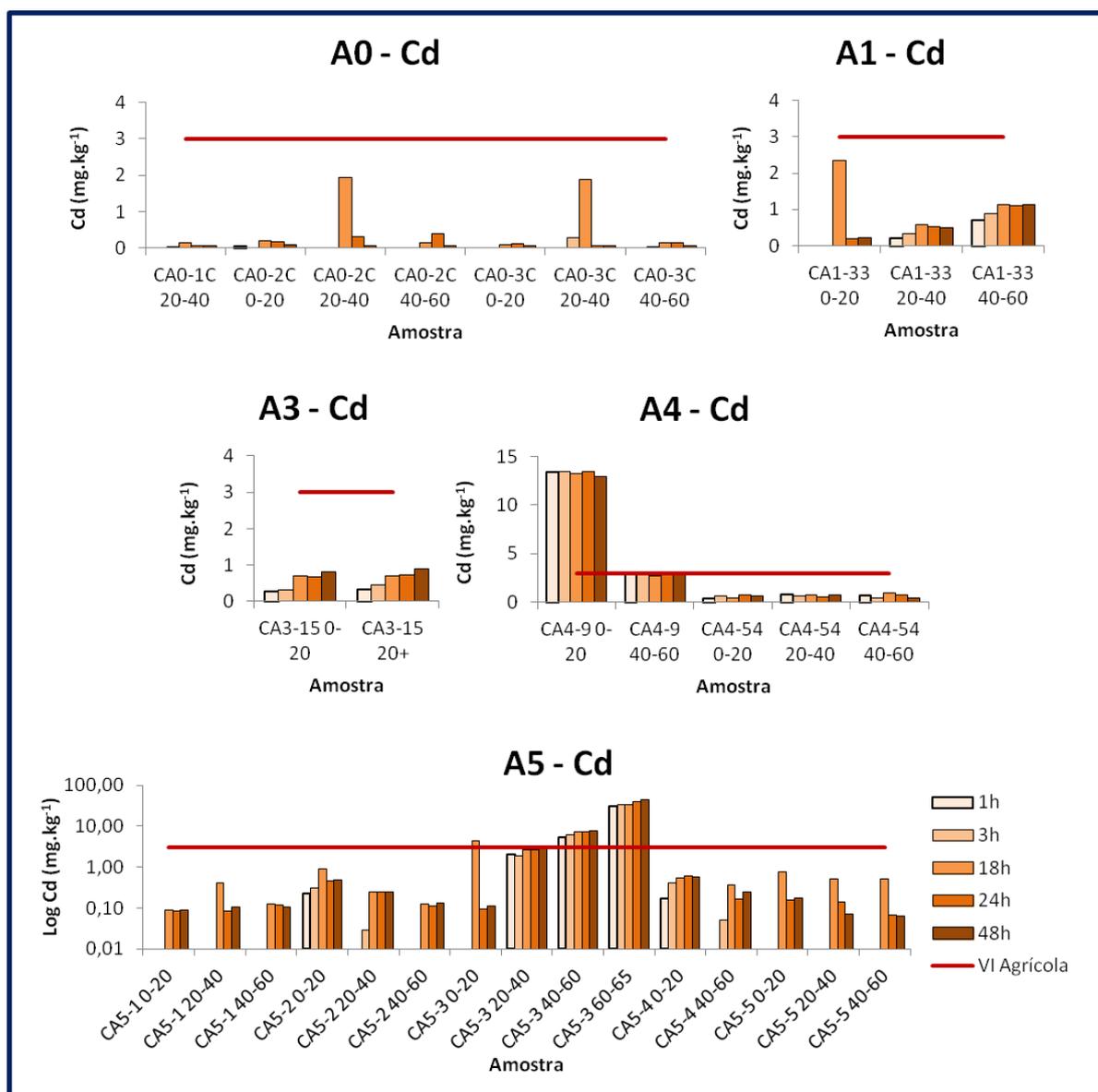


Figura 5.30: Valores de cádmio obtidos nos ensaios de lixiviação, para todas as áreas.

À semelhança do que acontece com o cádmio, também no zinco se verificam picos máximos de concentração extraída às dezoito horas, diminuindo às vinte e quatro horas e mantendo-se mais ou menos constante até ao final do ensaio. Este comportamento é mais uma prova do tempo necessário para que se verifique um equilíbrio entre os solos e a água.

Verifica-se ainda que as amostras que no cádmio excedem o limite correspondente ao Valor de Investigação Agrícola (de 3 mg.kg<sup>-1</sup> para o cádmio e de 450 mg.kg<sup>-1</sup> para o zinco) apresentam o mesmo comportamento no zinco, no entanto, por o limite para este elemento ser muito superior ao do cádmio, não se verificam tantas excedências nos teores. Estas amostras encontram-se em zonas de antigos depósitos de resíduos, especialmente ricos em cádmio e zinco, conforme ilustrado na Figura 1.3, o que explica este comportamento.

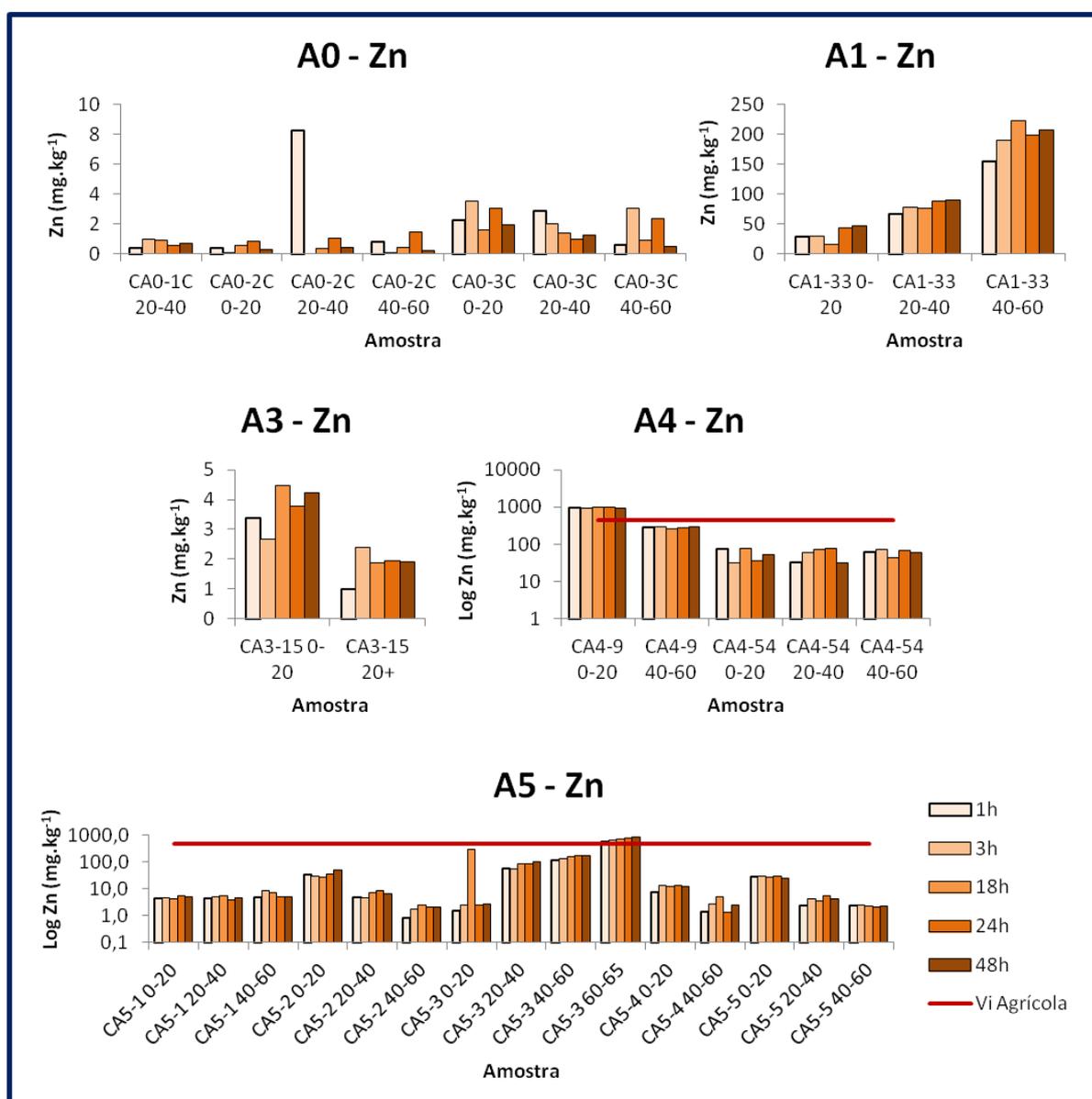


Figura 5.31: Valores de zinco obtidos nos ensaios de lixiviação, para todas as áreas.

Os teores extraídos no ensaio de lixiviação às 18h (por apresentarem os valores mais elevados ao longo do ensaio) foram comparados com os teores extraídos na primeira fase da extracção sequencial, correspondente à fracção mais solúvel (Figura 5.32). A comparação entre estes dois dados permite compreender que parte da fracção mais solúvel é facilmente removível da amostra, através de uma simples agitação com água de pH semelhante ao das chuvas locais.

Assim, e tendo como base a Figura 5.32, o cádmio e o zinco apresentam teores lixiviados muito elevados, correspondendo aproximadamente à totalidade da fracção extraída por acetato de amónio, à excepção da amostra CA3-15; por sua vez, o cobalto apresenta um comportamento muito semelhante, sendo a lixiviação nas amostras CA5-2, CA5-3 e CA5-4 pouco significativas; para o cobre, o níquel e o chumbo são lixiviadas concentrações muito baixas, tendo em conta a fracção extraída na primeira fase da extracção sequencial, o que mostra a grande imobilidade destes elementos e a difícil passagem para a fracção dissolvida; no entanto, o níquel apresenta nas amostras CA1-33 e CA4-9 teores aproximadamente iguais aos extraídos por acetato de amónio. O ferro apresenta valores lixiviados aproximadamente de 50% da fracção solúvel, à excepção das amostras CA5-2 (0-20 cm) e CA5-4 (40-60 cm). Por seu lado, o manganês apresenta valores lixiviados muito baixos, à excepção da amostra CA4-9.

A diferença identificada entre os teores obtidos pelos dois métodos deve-se, primeiramente, ao pH dos extractantes utilizados. A água utilizada no ensaio de lixiviação foi uniformizada ao pH das chuvas locais, com valor aproximado de 6,5 e o acetato de amónio possui um pH na ordem de 4,5. Deste modo, e sabendo que valores menores de pH permitem uma maior solubilização de elementos metálicos, é expectável que sejam extraídos teores mais elevados na primeira fase da extracção sequencial (Prochnow, 2008).

A variação destes valores em cada um dos elementos poderá ser explicada através das características que a área em estudo apresenta e pela natureza heterogénea dos resíduos que ao longo do funcionamento da unidade industrial foram depositados sobre os solos.

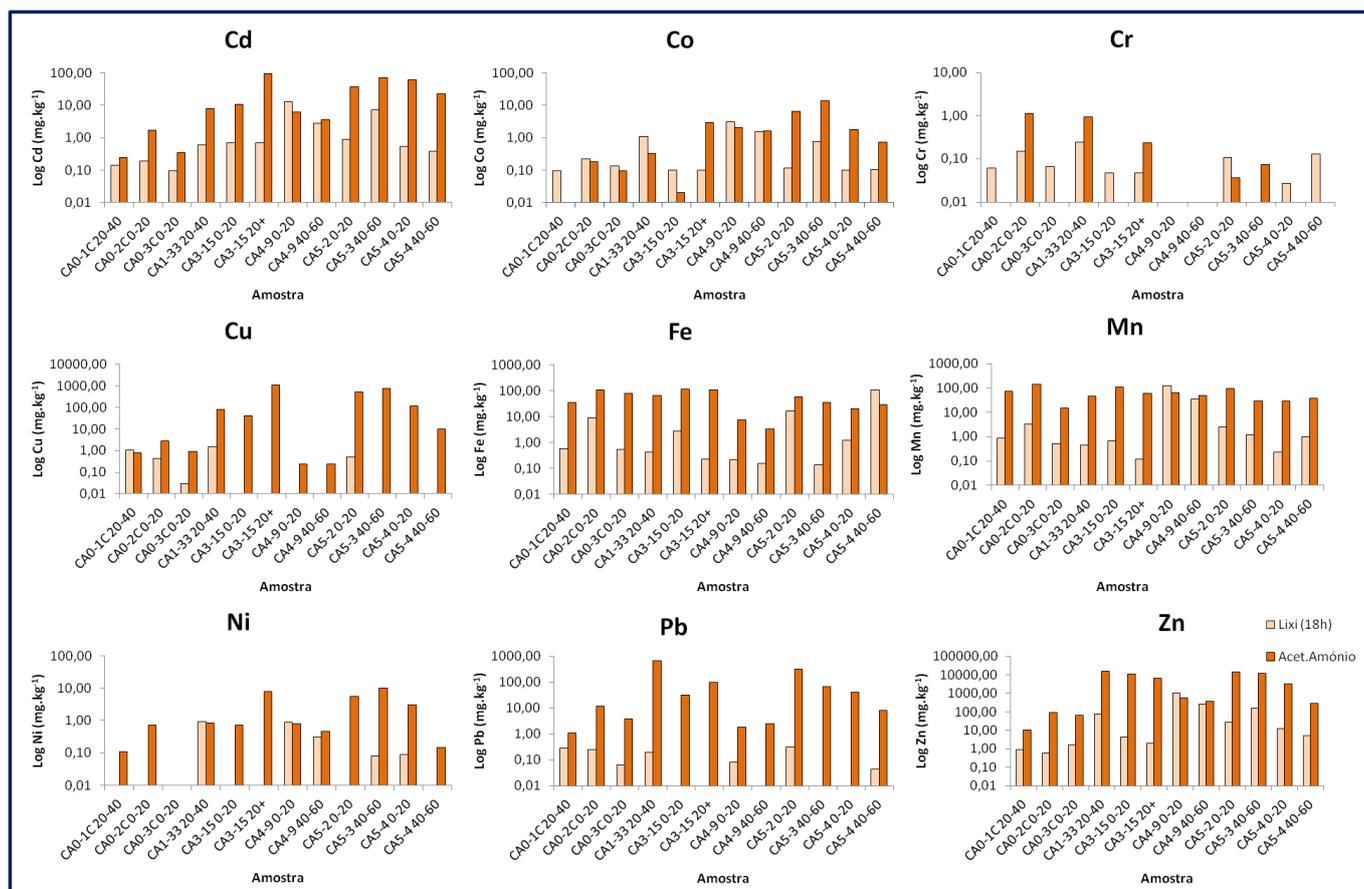


Figura 5.32: Comparação dos valores obtidos nos ensaios de lixiviação com os valores extraídos na primeira fase da extração sequencial.

## 5.7. Nutrientes

### 5.7.1. Cálcio

A quantidade de cálcio num solo depende de um grande número de factores, relacionados com o clima e o grau de meteorização, assim como a própria natureza geológica das rochas que dão origem aos solos. O cálcio pode ocorrer de várias formas, nomeadamente sob a forma mineral (em silicatos, carbonatos, fosfatos ou sulfatos), permutável, adsorvido em superfícies carregadas negativamente (complexos ou colóides orgânicos ou inorgânicos) ou em solução (Roy *et al.*, 2006).

A presença das diferentes formas de cálcio no solo caracteriza-se por um equilíbrio dinâmico. À medida que se verifica um decréscimo da quantidade de cálcio em solução, ocorre um reabastecimento pela fracção permutável, fazendo com que exista sempre cálcio em solução. Como elemento essencial para a sobrevivência de espécies vegetais, o facto de se verificar um reabastecimento para a fracção solúvel significa que, em princípio, não ocorrerá escassez neste

elemento, factor importante para a implementação de espécies vegetais num solo (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

Deste modo, às fracções de cálcio extraídas para cada uma das amostras de solo, procedeu-se à comparação com o limite que estipula os valores óptimos deste elemento para o uso agrícola (Figura 5.33), valores estes já explicitados na Figura 4.17 (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*). Este valor corresponde à fracção extraída pelo método do acetato de amónio, conforme o utilizado para os solos da área em estudo (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

Verifica-se assim que as amostras com teores óptimos de cálcio para a implementação de espécies vegetais são as amostras CA1-19, CA1-33, CA4-40, CA5-1, CA5-3 e CA5-5.

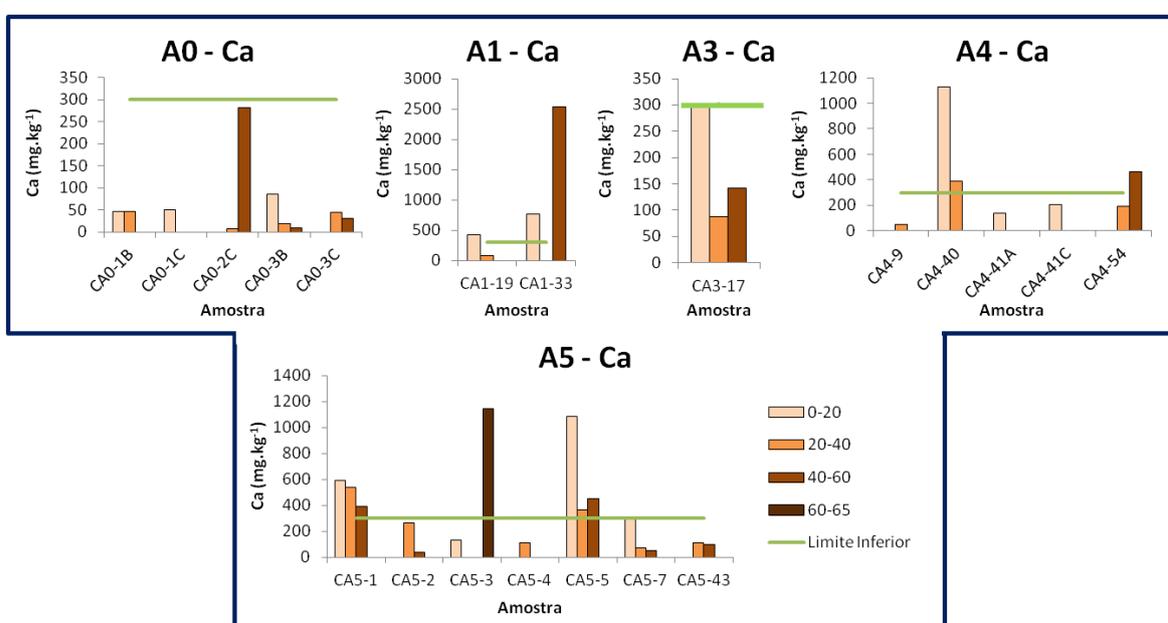


Figura 5.33: Teores de cálcio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

### 5.7.2. Potássio

De todos os catiões, o potássio ( $K^+$ ) é o catião absorvido em maior quantidade pelas plantas. No solo, encontra-se sob quatro formas distintas: sob a forma inorgânica, fixo entre as folhas dos minerais de argila, como catião de troca ou em solução. A dinâmica do potássio (explícita na Figura 5.34) é determinada pela velocidade de troca dos iões  $K^+$  das superfícies dos minerais de argila ou em compostos orgânicos e pela velocidade de libertação pelos minerais ricos em potássio (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

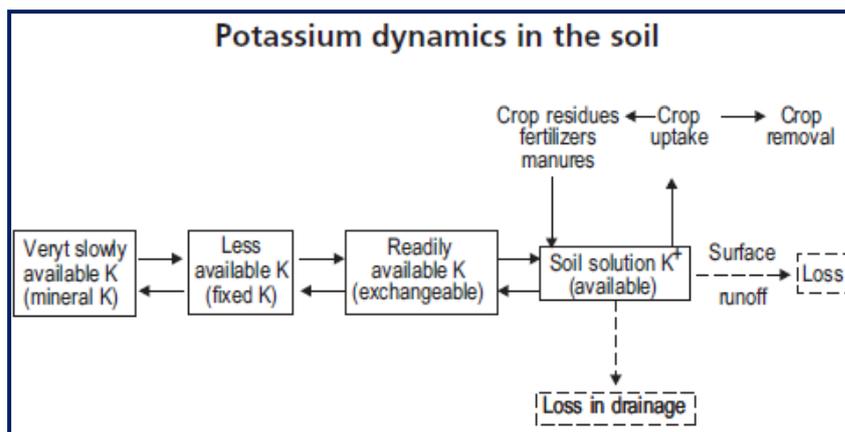


Figura 5.34: Dinâmica do potássio no solo. De Roy *et al.* (2006).

Na área em estudo, o potássio disponível deverá corresponder ao que se encontra ligado a minerais argilosos, fixo entre os seus folhetos ou adsorvido à sua superfície, devido ao histórico de acumulação de resíduos industriais nas suas imediações e ao tipo de solo. A Figura 5.35 permite identificar os teores mais solúveis deste elemento, e a sua variação em profundidade, assim como a comparação com os valores óptimos para a implementação de espécies vegetais (Horneck *et al.*, 2011). Estes valores correspondem à fracção extraível por acetato de amónio, conforme as amostras da área em estudo (Marx *et al.*, 1999; Horneck *et al.*, 2011). De acordo com a Figura, vemos que esta área industrial não possui teores elevados neste elemento, sendo que as maiores concentrações identificadas em algumas amostras (CA1-33, CA5-5 ou CA5-43) se poderão dever a enriquecimentos locais relacionados a minerais ricos em potássio. No entanto, para esta hipótese ser posta com mais certeza, teriam de ser correlacionados dados de mineralogia locais.

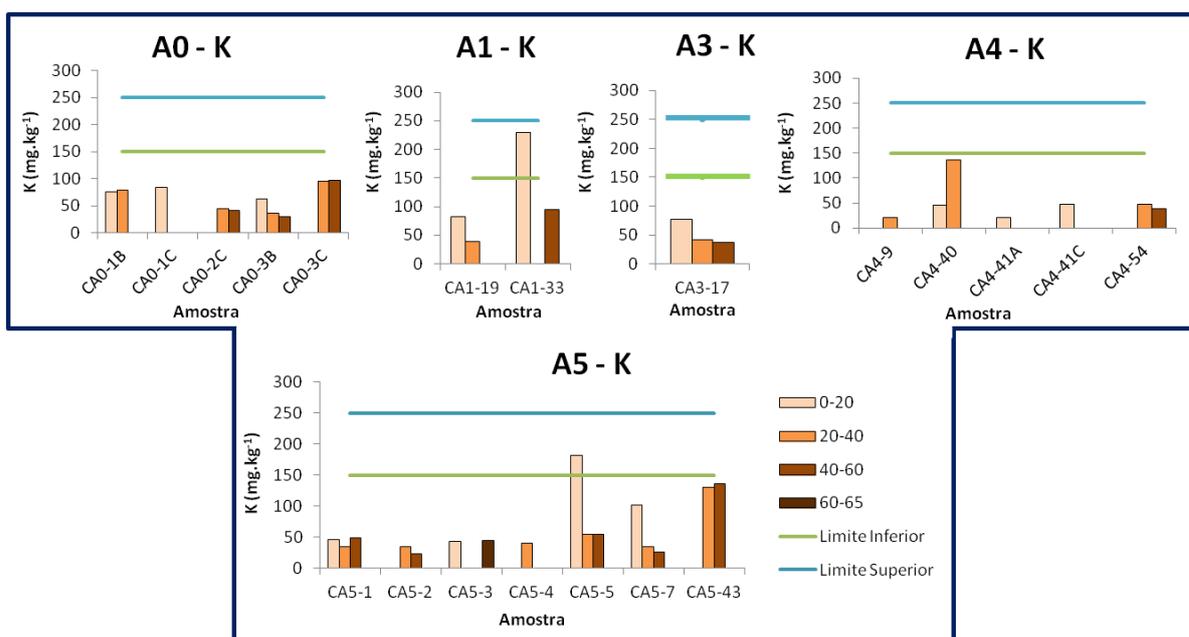


Figura 5.35: Teores de potássio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Horneck *et al.*, 2011).

### 5.7.3. Magnésio

Do ponto de vista da nutrição das plantas, as fracções ricas em magnésio são tão importantes como o potássio. No solo, o magnésio pode ser encontrado associado a minerais primários (como a hornblenda ou a biotite) ou a minerais secundários (como a vermiculite), como catião de troca ou solúvel em água. À semelhança do que acontece para o cálcio, também no magnésio se verifica um equilíbrio dinâmico no solo, sendo que decréscimos na concentração de magnésio solúvel são compensados pela forma permutável (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

Nas amostras da área em estudo, a fracção extraída foi comparada com os níveis óptimos para o uso agrícola referidos por Horneck *et al.* (2011), sendo representada na Figura 5.36. Esta fracção, à semelhança do que foi realizado nos solos da área em estudo, corresponde à extraível pelo método do acetato de amónio (Marx *et al.*, 1999; Horneck *et al.*, 2011).

Esta permite-nos identificar valores em geral muito baixos em todas as áreas, à excepção da amostra CA5-3 (60-65 cm). Este valor anormalmente mais alto poderá relacionar-se com a geologia da área e com a existência de minerais ricos em magnésio. No entanto esta hipótese teria de ser posta à prova, por comparação dos dados de mineralogia locais.

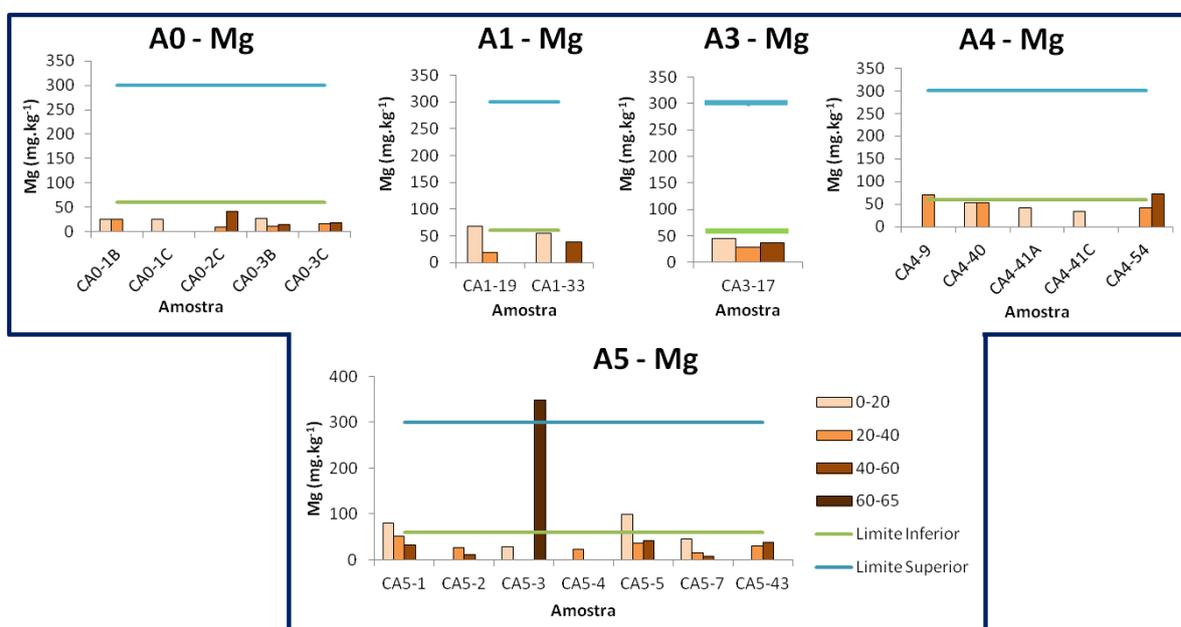


Figura 5.36: Teores de magnésio obtidos nos solos e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Horneck *et al.*, 2011).

### 5.7.4. Fósforo

Como já foi referido, o fósforo é um dos nutrientes mais reactivos no solo. Deste modo, quando é adicionado fósforo solúvel aos solos, este tenderá a tornar-se estável e, por isso, menos disponível para as plantas. A dinâmica deste elemento encontra-se explicitada na Figura 5.37.

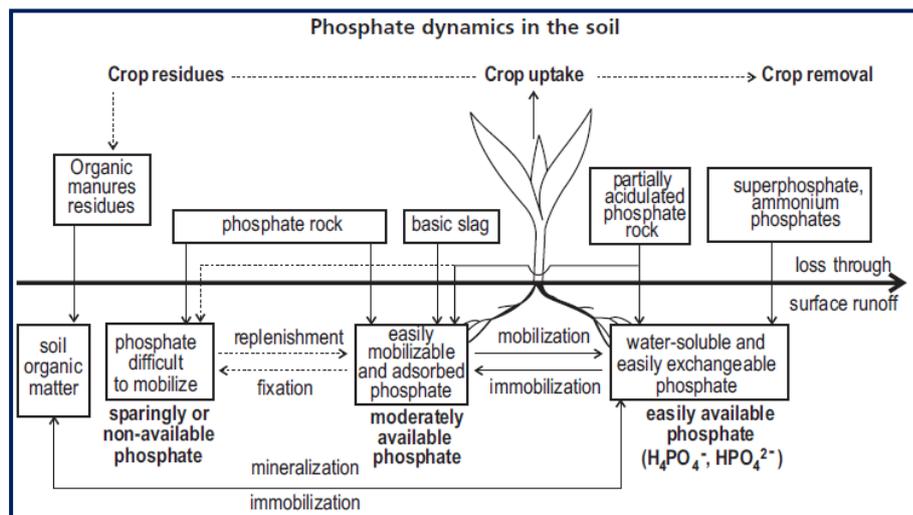


Figura 5.37: Dinâmica do fósforo no solo.  
De Roy *et al.* (2006).

Este comportamento deve-se à existência no solo de agentes adsorventes de fósforo, nomeadamente argilas, óxidos de ferro e/ou alumínio e carbonatos de cálcio e/ou magnésio (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006; Wardlab). É por esta razão que se torna muito importante a determinação da fracção assimilável, que será a mesma tida como referência para a caracterização da fertilidade dos solos.

A Figura 5.38 compara assim os valores obtidos para o fósforo total e para o fósforo assimilável dos solos da área em estudo. Verifica-se que os valores obtidos para o fósforo assimilável são essencialmente muito baixos, identificando-se amostras em que a diferença entre o fósforo total e o fósforo assimilável atinge duas ordens de grandeza. No entanto, em algumas amostras, nomeadamente nas amostras CA1-33 e CA3-15, existem valores mais elevados de fósforo assimilável, que poderão corresponder a áreas com a possibilidade de implementação de espécies vegetais.

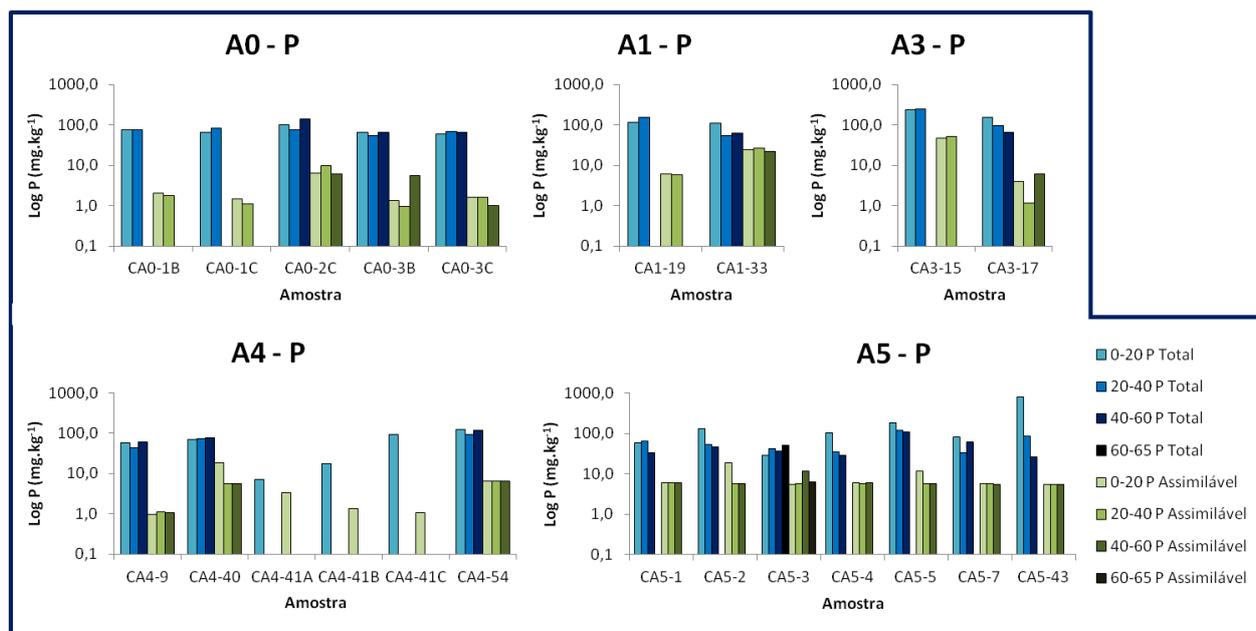


Figura 5.38: Comparação dos valores de fósforo total e fósforo assimilável determinados nos solos da área.

Comparando os teores de fósforo assimilável com os tidos como referência em estudos de fertilidade tendo em conta o método de extração utilizado (Kepner *et al.*, 2003), conforme expresso na Figura 5.39. Os mesmos autores referem que solos que apresentem valores:

- Abaixo de 25 mg.kg<sup>-1</sup> se classificam como solos muito pobres em fósforo;
- Entre 25 e 50 mg.kg<sup>-1</sup> como solos pobres em fósforo;
- Entre 50 e 100 mg.kg<sup>-1</sup> como solos com teores médios em fósforo;
- Entre 100 e 200 mg.kg<sup>-1</sup> como solos ricos em fósforo;
- Acima de 200 mg.kg<sup>-1</sup> como solos muito ricos em fósforo.

Verificam-se teores muito baixos, ao longo de todas as áreas. Apenas na amostra CA3-15 se identificam valores de fósforo assimilável próximos aos níveis correspondentes a solos com teores médios. Estes valores muito baixos no teor em fósforo poderão dever-se à presença de agentes adsorventes, nomeadamente minerais de argila (caulinite) e óxidos de ferro, com capacidade de trocar os seus grupos OH<sup>-</sup> por aniões ortofosfato, o que denota a sua baixa solubilidade em solos lateríticos. A existência de uma amostra (CA3-15) onde localmente se identificam teores mais elevados de fósforo (correspondentes a teores médios de fósforo, segundo os valores expressos por Kepner *et al.* (2003)) podem ser relacionados a contaminações e/ou lixiviações de efluentes domésticos ou industriais, associados a concentrações menores dos constituintes minerais capazes de os reter.

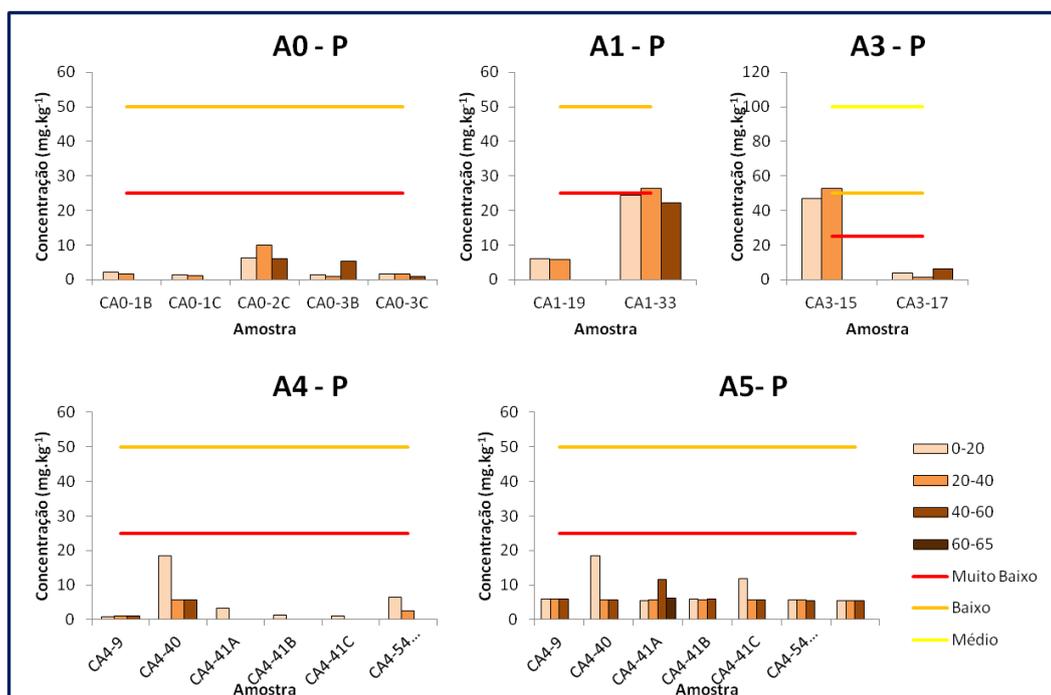


Figura 5.39: Teores de fósforo obtidos nos solos e comparação com os valores de referência (Kepner *et al.*, 2003). Os limites superior e inferior delimitam os níveis correspondentes aos teores médios de fósforo no solo, de acordo com a bibliografia.

### 5.7.5. Cobre

O cobre nos solos pode encontrar-se sob diversas formas, nomeadamente em solução, formando complexos estáveis com matéria orgânica (húmus) e adsorvido e/ou absorvido em óxidos e hidróxidos de manganês, adsorvido no complexo coloidal argila-húmus ou na fase cristalina, podendo passar para qualquer uma das restantes fases por meteorização química (Shorrocks & Alloway, 1988 *in* Roy *et al.*, 2006). A presença de cobre nos solos é ainda controlada pelo pH dos próprios solos (visto que a sua solubilidade diminui com o aumento do pH, como ilustrado na Figura 5.40) e o teor em carbonatos, matéria orgânica e argila (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

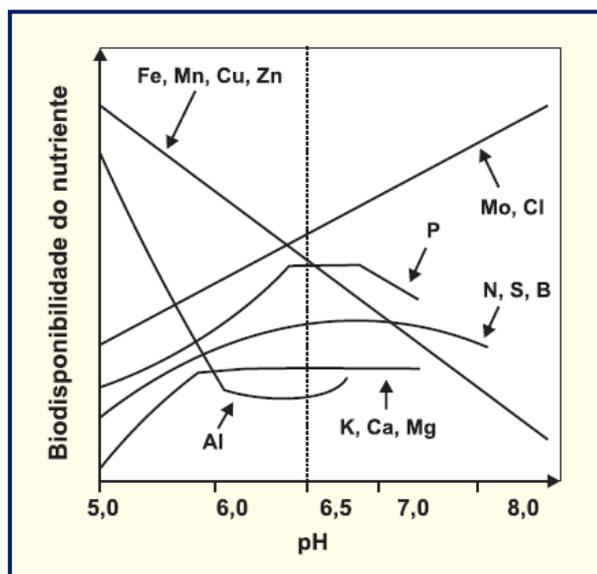


Figura 5.40: Biodisponibilidade dos nutrientes de acordo com o pH do solo. De Prochnow (2008).

Nos solos da área em estudo a existência de cobre associa-se ao facto de este elemento estar associado aos depósitos de resíduos do funcionamento da unidade industrial da Votorantim Metais S.A.. Assim, através da representação da concentração obtida na extracção e da sua variação em profundidade (Figura 5.41) pretende-se estipular se os teores em cobre poderão ou não ser nefastos na utilização dos solos para fins agrícolas, tendo em conta a extracção em acetato de amónio efectuada (Loch, 2006; *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*). De acordo com a Figura 5.41 é possível observar que na sua maioria, os solos não apresentam valores excessivos em cobre para a implementação de espécies vegetais, sendo apenas muito elevadas as concentrações obtidas nas amostras CA1-33, CA4-54, CA5-1, CA5-3, CA5-4 e CA5-7. Estes valores excessivos podem representar valores tóxicos para a maioria das espécies vegetais, e poderão relacionar-se com as características de aterro que a área apresenta, assim como as variações de pH que localmente os solos apresentam e que poderão aumentar a solubilidade do cobre.

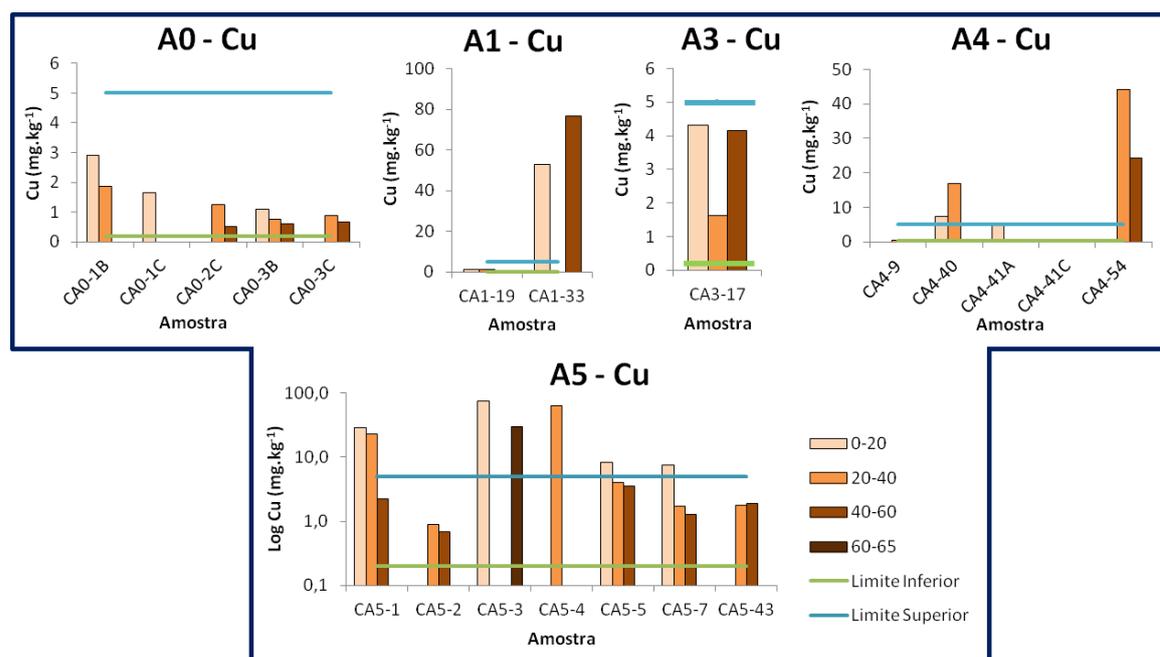


Figura 5.41: Teores de cobre obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; Department of Agriculture & Cooperation, Government of India).

### 5.7.6. Ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, constituindo cerca de 5,6%. Nos solos, o teor em ferro varia entre 1 e 25%, e pode ser encontrado sob a forma imediatamente disponível, com fases de ligação, disponível após decomposição ou como fontes potenciais a médio ou longo prazo (Katyal & Deb, 1982 *in* Roy *et al.*, 2006; OMAFRA, 2006). Apesar do alto teor de ferro nos solos, a sua disponibilidade é um problema, especialmente em solos de natureza alcalina ou calcária. O pH é, portanto, um dos maiores factores que controlam a solubilidade e disponibilidade do ferro para as plantas (Figura 5.40) (Roy *et al.*, 2006).

Na área em estudo, procedeu-se à avaliação para uso agrícola dos solos, tendo em conta os teores de ferro extraídos por acetato de amónio, que traduz a biodisponibilidade do elemento para plantas e microorganismos (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*) (Figura 5.42).

Assim, e tendo como base a Figura 5.42, é possível compreender que estes solos possuem teores muito elevados de ferro, superiores aos níveis óptimos dados pelos autores, o que já era esperado tendo em conta a natureza laterítica da maioria dos solos da área e o seu carácter ácido.

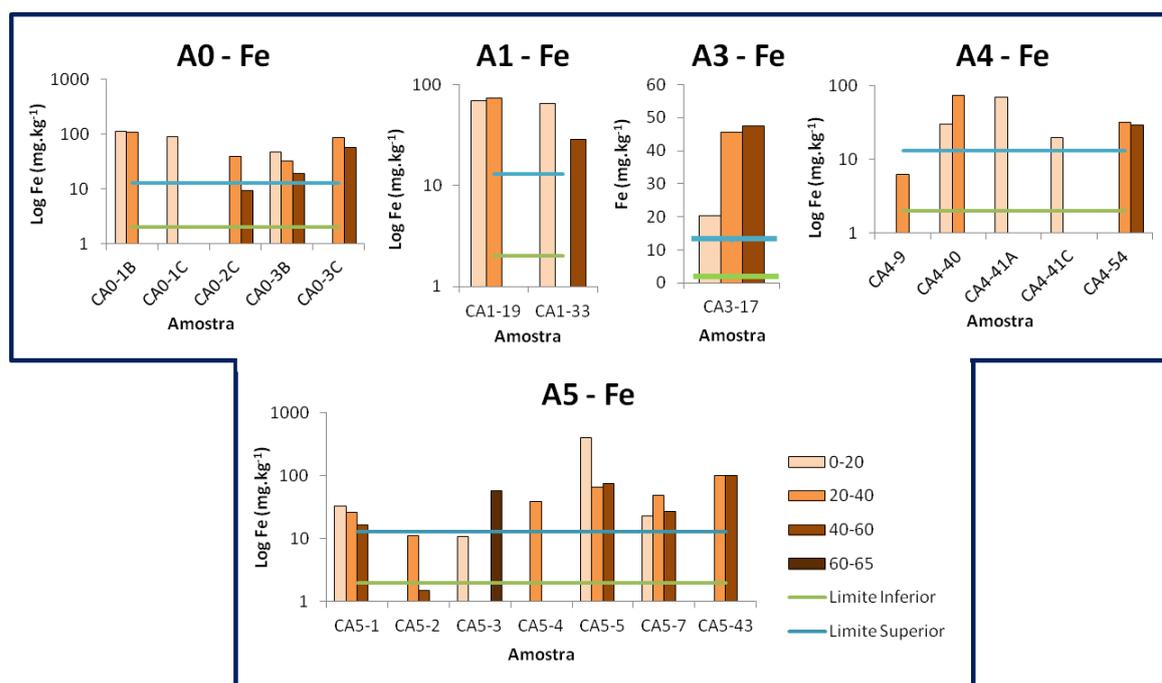


Figura 5.42: Teores de ferro obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

### 5.7.7. Manganês

Nos solos, o manganês pode ser encontrado de várias formas, nomeadamente, solúvel em água, como catião de troca, facilmente reduzível, complexado, ligado a complexos orgânicos ou presente nas fases cristalinas de alguns minerais. A fracção disponível consiste no conjunto das fracções solúvel, como catião de troca e facilmente reduzível (Roy *et al.*, 2006). No entanto, a biodisponibilidade do manganês nos solos depende (de acordo com OMAFRA, 2006 e Roy *et al.*, 2006):

- Da valência do manganês proveniente da meteorização dos minerais primários;
- Da natureza dos minerais primários;
- Do potencial de oxidação/redução e do pH;
- Da formação de complexos orgânicos;
- De actividade microbológica;
- De factores ambientais.

Na área em estudo, o manganês presente deverá provir dos resíduos da unidade industrial, devido à natureza do minério utilizado. Assim, para que possa ser determinada a fertilidade dos solos da área, procedeu-se à comparação dos teores obtidos pela extração com acetato de amónio (formas mais lábeis de manganês) com os níveis de referência para uso agrícola (Loch, 2006; *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*) (Figura 5.43). É de notar que os valores de referência apresentados por estes autores não correspondem à fracção extraída por acetato de amónio, utilizada neste trabalho, mas sim à extraída por DTPA. Embora estas fracções não sejam comparáveis, o facto de a fracção extraída por DTPA corresponder à fase capaz de ser mobilizada pelas espécies vegetais em estudos de fertilidade, permite dar uma ideia acerca dos valores extraídos por acetato de amónio e compreender se estes são teores muito elevados para a implementação de fitorremediação na área.

Tendo como base a Figura 5.43 é possível identificar que a maioria destes solos possui valores óptimos para uso agrícola, verificando-se apenas valores elevados nas amostras CA1-19, CA3-17, CA4-9, CA4-41A, CA5-3, CA5-5 e CA5-7. Estes teores mais elevados poderão relacionar-se com diferenças locais nos resíduos depositados devido às características típicas de aterro que se verifica na área em estudo.

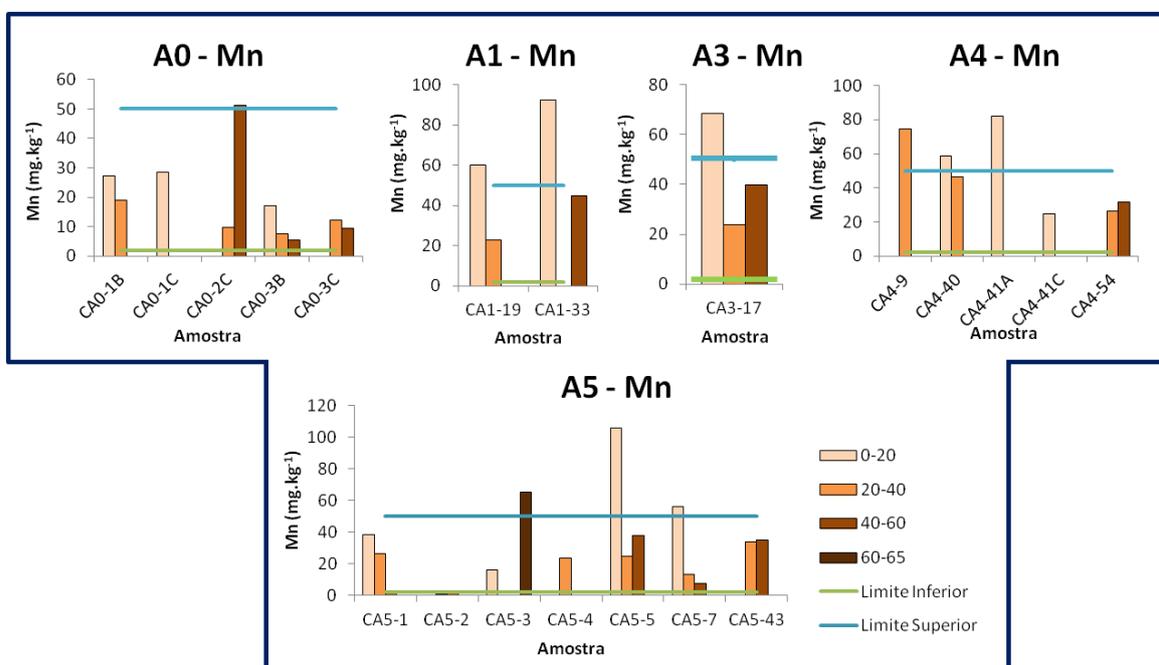


Figura 5.43: Teores de manganês obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

### 5.7.8. Molibdénio

No solo, o ião molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) é fortemente absorvido pelos minerais e colóides, a pH inferior a 6, sendo que, ao contrário de outros micronutrientes, a sua biodisponibilidade aumenta com o aumento do pH (Figura 5.40). Independentemente do pH, em zonas com meteorização muito elevada, os minerais secundários podem incluir este elemento, podendo ainda ser fixado em silicatos de alumínio hidratados (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

Para a área em estudo, apresenta-se a Figura 5.44 de forma a permitir a comparação dos teores extraídos com acetato de amónio nos solos com os valores óptimos para uso agrícola (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*). É, assim, possível identificar que a maioria das amostras apresenta teores favoráveis para a implementação de espécies vegetais.

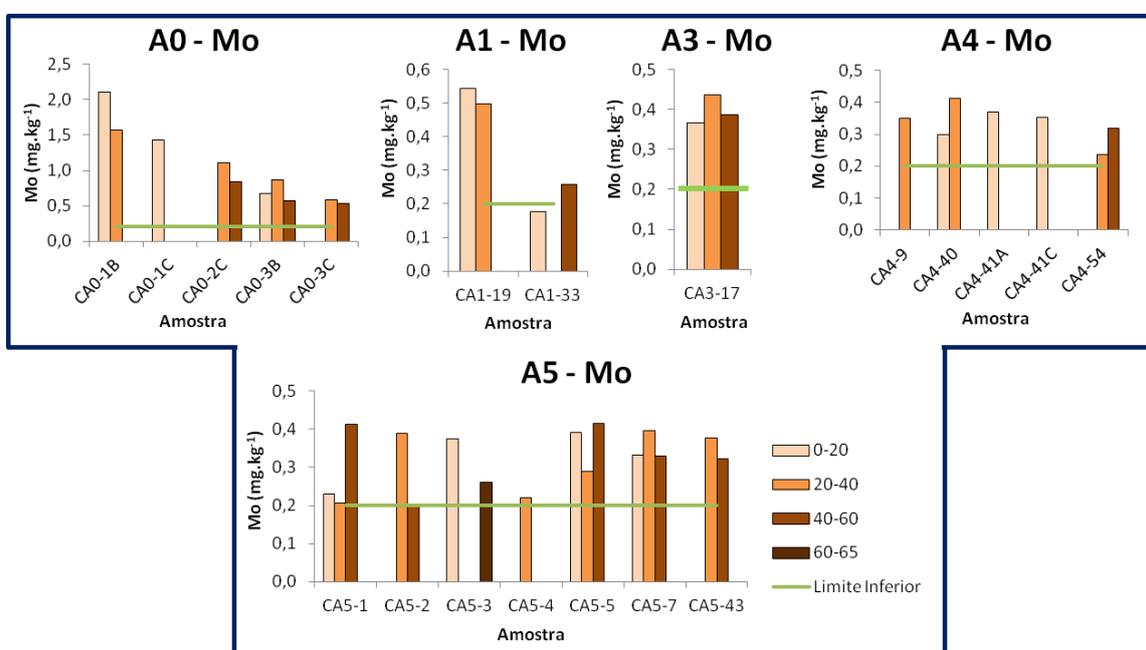


Figura 5.44: Teores de Molibdénio obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

### 5.7.9. Zinco

Os teores normais de zinco num solo variam entre 10 e 1000 mg/kg, no entanto, este valor tende a ser muito inferior em solos lateríticos altamente meteorizados e em solos vermelhos. O zinco pode ocorrer sob variadas formas, nomeadamente solúvel em água, como catião de troca, complexo, ligado a matéria orgânica ou solúvel em ácido. As formas biodisponíveis para plantas compreendem as fases solúvel em água, como catião de troca e complexadas (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

No entanto, a biodisponibilidade do zinco varia com o pH, sendo que um aumento do pH leva à diminuição da sua biodisponibilidade (Figura 5.40) (OMAFRA, 2006; Roy *et al.*, 2006).

Na área em estudo, de modo a compreender a adequabilidade dos solos para a implementação de espécies vegetais, procedeu-se à comparação dos teores extraídos com acetato de amónio (zinco na forma solúvel e como catião de troca) com os limites considerados óptimos para uso agrícola (Figura 5.45) (Loch, 2006; *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*). Estes autores referem que estes valores de referência (já explicitados na Tabela 4.17) se tratam da fracção extraída por DTPA, tendo-se procedido à comparação destes parâmetros com os teores obtidos na extracção por acetato de amónio, conforme realizado para o manganês.

É possível observar que os teores são, na grande maioria das amostras, elevados, verificando-se apenas teores óptimos na amostra CA0-2C. A grande maioria dos teores determinados ultrapassam os  $15 \text{ mg.kg}^{-1}$ , apresentando valores de zinco excessivos para o uso agrícola (ver Tabela 4.17) e podendo representar valores tóxicos para a maioria das espécies vegetais. Tendo presente a bibliografia que refere que este tipo de solos é altamente empobrecido em zinco, os valores obtidos são extremamente elevados na área, ultrapassando em larga escala as concentrações óptimas para a implementação de espécies vegetais, o que se deverá ao funcionamento da unidade industrial de Três Marias e à eliminação dos seus resíduos na área envolvente.

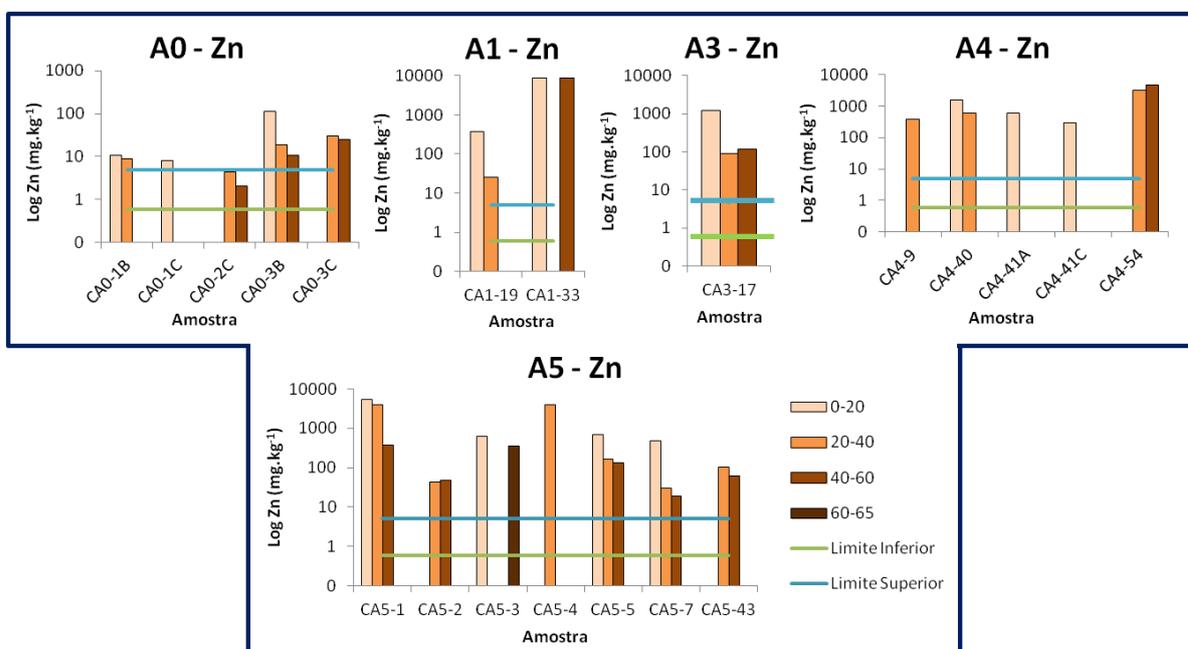


Figura 5.45: Teores de zinco obtidos nos solos, e comparação com os valores óptimos para o uso agrícola (Loch, 2006; *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*).

### 5.7.10. Índice de Nutrientes

De forma a facilitar a determinação da adequabilidade em determinado nutriente de um solo para o uso agrícola, Parker (1951) in *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*; Ravikumar & Somashekar (2013) criou o Índice de Nutrientes. Esta é uma forma simples de determinar, para um grande número de amostras, análises e resultados, a fertilidade dos solos, sendo o objectivo final o mapeamento destes resultados (*Department of Agriculture & Cooperation, Government of India*). O Índice de Nutrientes (IN) é assim dado pela expressão:

$$IN = \frac{(N_b \times 1) + (N_m \times 1) + (N_a \times 1)}{N_T}$$

Em que,  $N_b$  representa o número de amostras que apresentam categoria “baixo” para um dado nutriente;  $N_m$  representa o número de amostras que apresentam categoria “ótimo” para um dado nutriente;  $N_a$  representa o número de amostras que apresentam categoria “elevado” para um dado nutriente;  $N_T$  representa o número de total de amostras analisadas num dado nutriente.

Ravikumar & Somashekar (2013) definem para o Índice de Nutrientes os seguintes valores:

- Para Índice de Nutrientes inferior a 1,67 – baixo;
- Para Índice de Nutrientes entre 1,67 e 2,33 – ótimo;
- Para Índice de Nutrientes superior a 2,33 – elevado.

No caso concreto da área em estudo, resolveu-se adaptar este índice para compreender para cada área, em detrimento de cada elemento, se os teores de nutrientes, e respectivas categorias que ocupam, tornam os solos adequados ou inaptos para a implementação de espécies vegetais. Assim, a expressão anterior foi alterada, e o Índice de Nutrientes utilizado corresponde a:

$$IN = \frac{(N_b \times 1) + (N_m \times 1) + (N_a \times 1)}{N_T}$$

Em que,  $N_b$  representa o número de nutrientes que apresentam categoria “baixo” numa dada área;  $N_m$  representa o número de nutrientes que apresentam categoria “ótimo” numa dada área;  $N_a$  representa o número de nutrientes que apresentam categoria “elevado” numa dada área;  $N_T$  representa o número total de nutrientes analisados numa dada área.

Apresentam-se assim, na Tabela 5.5, os resultados referentes ao cálculo do Índice de Nutrientes para as diferentes áreas:

Tabela 5.5: Valores determinados para o Índice de Nutrientes (IN) nas várias áreas, para os macro e micronutrientes. A amarelo representam-se valores de IN baixos; a verde, IN óptimos; a vermelho IN elevados.

	Macronutrientes	Micronutrientes	Macro e Micronutrientes
Área	IN	IN	IN
A1	1,438	2,550	2,056
A3	1,417	2,467	2,000
A4	1,188	2,575	1,958
A5	1,219	2,443	1,903

É assim notório que nos principais macronutrientes, todas as áreas apresentam valores baixos, classificando estes solos como solos baixa fertilidade; por outro lado, os micronutrientes apresentam valores claramente elevados, resultado da contribuição da contaminação; obviamente, quando são calculados os valores do Índice de Nutrientes para todos os nutrientes, os valores do Índice de Nutrientes indicam como óptimo o nível de nutrientes dos solos.

O resultado “bom” para o Índice de Nutrientes na área em estudo não significa que estes solos sejam adequados para uso agrícola. Prova desse facto são os resultados, no cálculo do Índice de Nutrientes, baixos para os macronutrientes e demasiado elevados para os micronutrientes. Deste modo, é necessária alguma cautela quando se avaliam áreas tendo como base este índice uma vez que este índice apresenta apenas uma avaliação qualitativa, ao contrários dos índices utilizados para determinar o grau de contaminação.

Há ainda a ter em conta que as espécies vegetais a implementar na área, no caso de a fitorremediação ser a técnica de remediação escolhida para a área em estudo, não serão espécies comuns. Terão de ser espécies adaptadas a teores elevados de elementos metálicos, que possam acumulá-los na sua parte aérea e que consigam sobreviver tendo em conta o clima da região. Neste contexto, e por se tratar de uma área contaminada em metais, apenas poderá ser considerado o Índice de Nutrientes para os Macronutrientes, visto que os teores em alguns Micronutrientes, como já foi referido para o caso do zinco, são muito superiores aos valores excessivos. O Índice de Nutrientes permite ainda compreender se será necessária a aplicação de correcções de nutrientes, especialmente no que diz respeito aos seus valores baixos.

## 5.8. Textura

A textura do solo influencia as suas propriedades físicas, como a capacidade de infiltração e armazenamento de água, a fertilidade, o potencial de erosão, a compactação e a porosidade (Wardlab). Assim, para a caracterização da área e determinação da adequabilidade destes solos para a implementação de fitorremediação, a caracterização textural dos solos é muito importante.

Segundo Roy *et al.* (2006), e conforme é explicitado na Tabela 5.6, os solos arenosos são pobres em nutrientes e possuem pequena capacidade de armazenamento de água, no entanto providenciam condições favoráveis para o crescimento radicular, aeração do solo e drenagem do excesso de água; por outro lado, os solos argilosos são normalmente mais ricos em nutrientes, possuem uma alta capacidade de armazenamento de água, no entanto possuem uma aeração restrita. Deste modo, os melhores solos corresponderão a solos com características mistas, sendo considerados os mais apropriados à implementação de culturas vegetais.

Tabela 5.6: Relação entre as propriedades físicas do solo e as frações granulométricas. De Roy *et al.* (2006).

Physical property	Relative impact of the fraction on the soil property			
	Coarse sand	Fine sand	Silt	Clay
Water holding capacity	Very low	Medium	High	Very high
Capillarity	Very low	Good	Great	Very great
Rate of water movement	Very fast	Fast	Slow	Very slow
	(down)	(down and up)	(down and up)	(down and up)
Absorption capacity (for gases, water and plant nutrients)	Very slight	Slight	High	Very high
Cohesion and plasticity	None	Slight	High	Very high
Relative temperature	Warm	Fairly warm	Cold	Very cold
Aeration	Very good	Fairly good	Poor	Very poor

As percentagens de areia, limo e argila determinados nos solos foram projectadas no triângulo para a classificação de solos de Atterberg (Figura 5.46).

De acordo com a classificação de Atterberg, adoptada também pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (U.S.D.A.) para a determinação da adequabilidade dos solos para culturas agrícolas, é possível observar que a grande maioria das amostras de solos corresponde a solos argilosos, identificando-se ainda algumas amostras que correspondem a solos franco-argilosos. Deste modo, é fácil denotar a natureza essencialmente argilosa dos solos da área em estudo, assim como a sua importante componente arenosa.

Estes valores podem ser explicados tendo em conta não apenas a geologia da área em estudo, composta por rochas sedimentares detríticas, de grão essencialmente fino (siltitos e argilitos) mas também pela presença da unidade industrial da Votorantim Metais S.A., cuja actividade contribuiu ao longo dos anos com detritos de variadas dimensões, que foram depositados nos solos da sua envolvente.

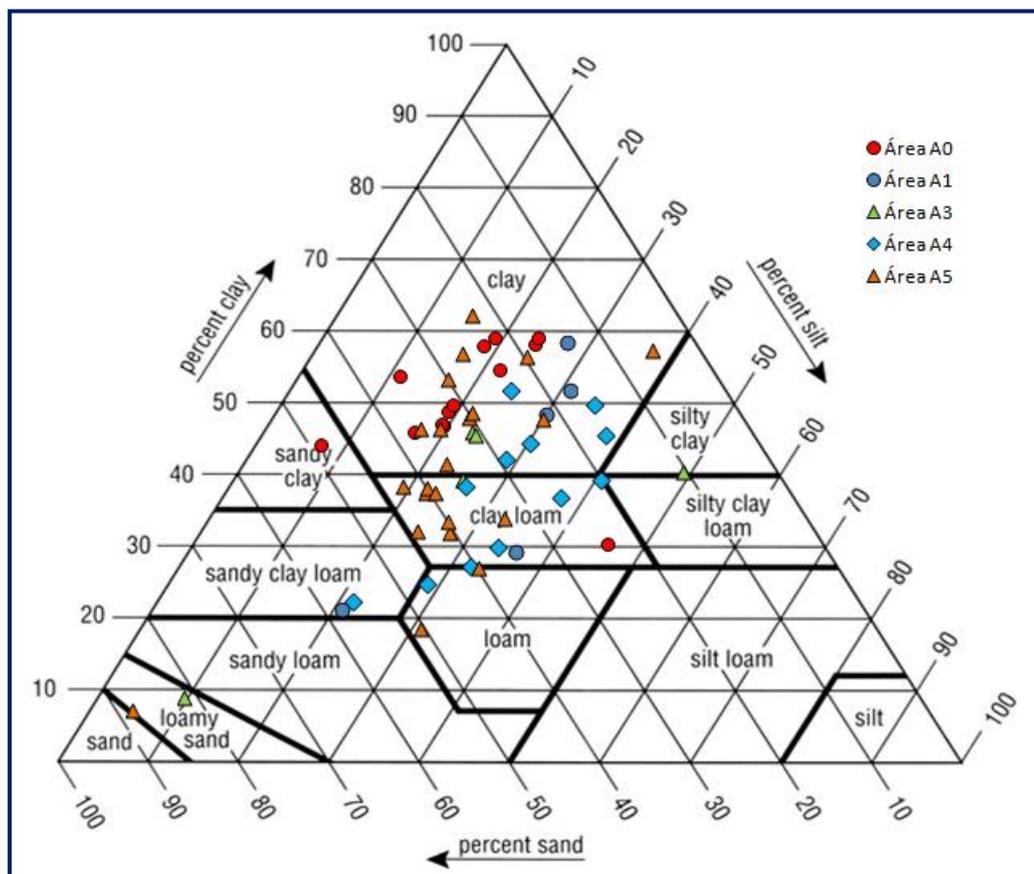


Figura 5.46: Classificação textural dos solos da área em estudo segundo a classificação de Atterberg.

A classificação da U.S.D.A. classifica os solos de acordo com a sua maior ou menor adequabilidade para o uso agrícola. Tendo em conta as características específicas de cada solo, segundo a classificação U.S.D.A., serão os solos do tipo *loam* (ver Figura 5.46) (correspondentes a solos francos), os mais adequados ao uso agrícola. Tendo em conta as percentagens nas classes texturais dos solos da área em estudo, verifica-se que a grande maioria das amostras (que correspondem essencialmente a solos argilosos ou franco-argilosos) não são solos óptimos para a prática agrícola, no entanto possuem características mistas, sendo assim possível a sua adaptação à implementação de espécies vegetais, considerando a possibilidade de recuperação ambiental da área por fitorremediação.

## 5.9. Porosidade

A importância da determinação da porosidade e, conseqüentemente, da densidade aparente e densidade das partículas não se prende simplesmente à comparação directa com os valores óptimos de solos para o uso agrícola, como se procedeu anteriormente (ver Densidade (Aparente e das Partículas) e Porosidade).

A porosidade pode relacionar-se com a textura, pois elevados valores de porosidade podem-se relacionar com materiais sedimentares mais finos e cujo empacotamento é mais imperfeito.

A Figura 5.48 demonstra exactamente esta relação nas amostras da área em estudo. Verifica-se então que os valores de porosidade são, em regra, superiores aos teores em argila obtidos, identificando-se uma relação directa entre o aumento ou a diminuição de ambas as variáveis, que é mais visível nas áreas A0, A1 e A3. Desta forma, a porosidade destas amostras de solo será maioritariamente uma micro-porosidade, que é a forma de porosidade menos acessível à absorção de água pelas plantas, uma vez que a água existente em poros de pequena dimensão encontra-se fortemente retida por tensão superficial e o percurso de saída desta água é um percurso tortuoso, dificultando a sua mobilidade.

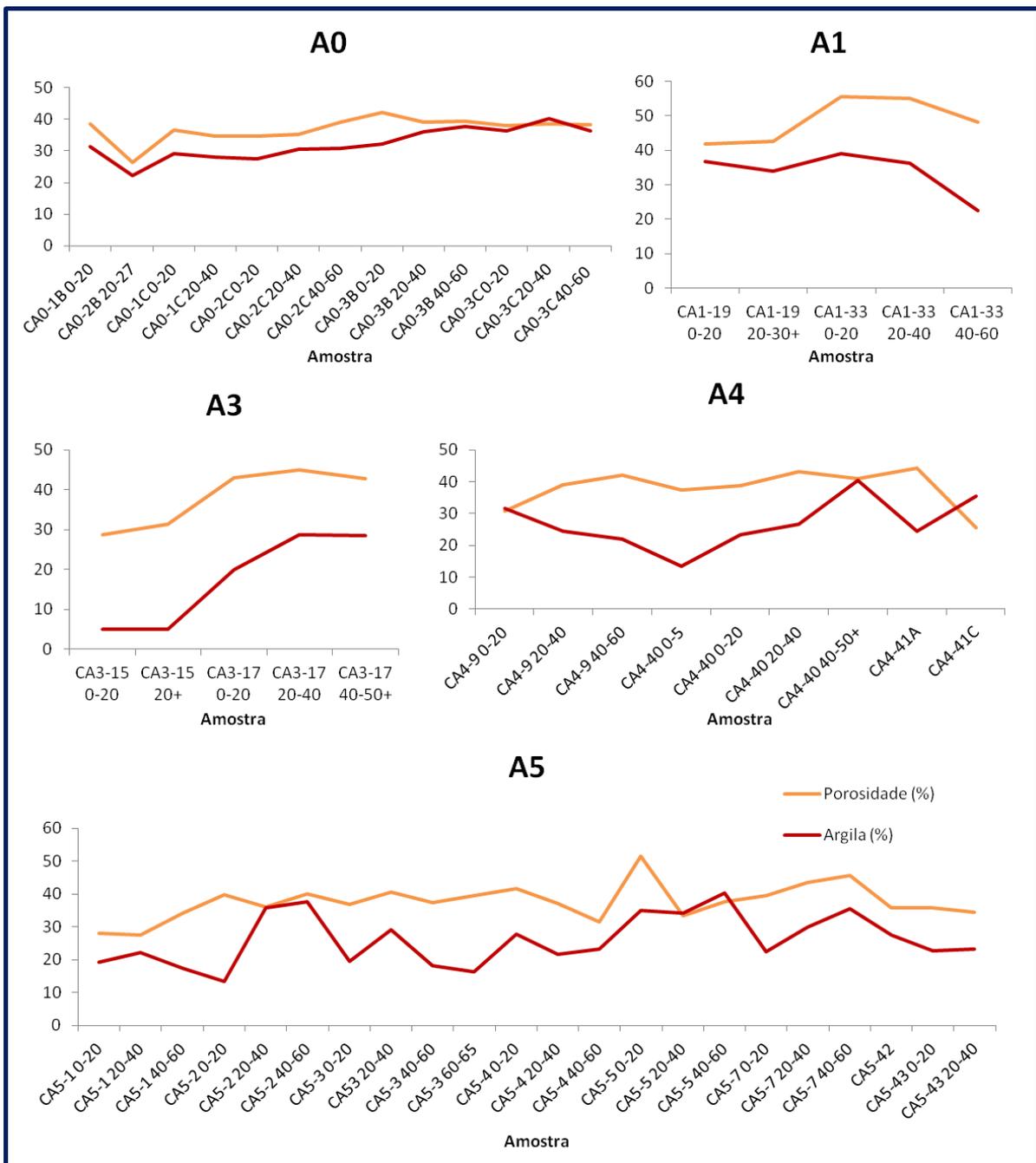


Figura 5.47: Relação entre a porosidade e o teor em argila das amostras estudadas.



## 6. Remediação



## Remediação dos Solos

Sabendo que os objectivos principais do projecto em que este trabalho se insere se relacionam com a recuperação ambiental desta área, é ainda necessário determinar as técnicas mais adequadas assim como as metodologias que podem ser aplicadas.

Deste modo, e como já foi referido anteriormente, as técnicas de remediação podem ser físico-químicas ou biológicas (Pivetz, 2001; Marques *et al.*, 2009). Entre as técnicas físico-químicas destacam-se:

- A técnica de solidificação/estabilização que envolve a adição de agentes ligantes ao solo contaminado, de forma a conter os contaminantes num produto sólido e reduzir o acesso a agentes externos; esta adição é normalmente realizada por mistura no solo ou injeção dos agentes directamente no interior do material contaminado (Figura 6.1). Os agentes ligantes podem ser inorgânicos, como argilas (bentonite ou caulinite), cimento, cinzas volantes, carbonato de cálcio, óxidos de ferro e/ou manganês, carvão vegetal ou zeólitos ou orgânicos como betume, estrume ou compostos orgânicos (U.S.EPA, 1997; Wuana & Okieimen, 2011);

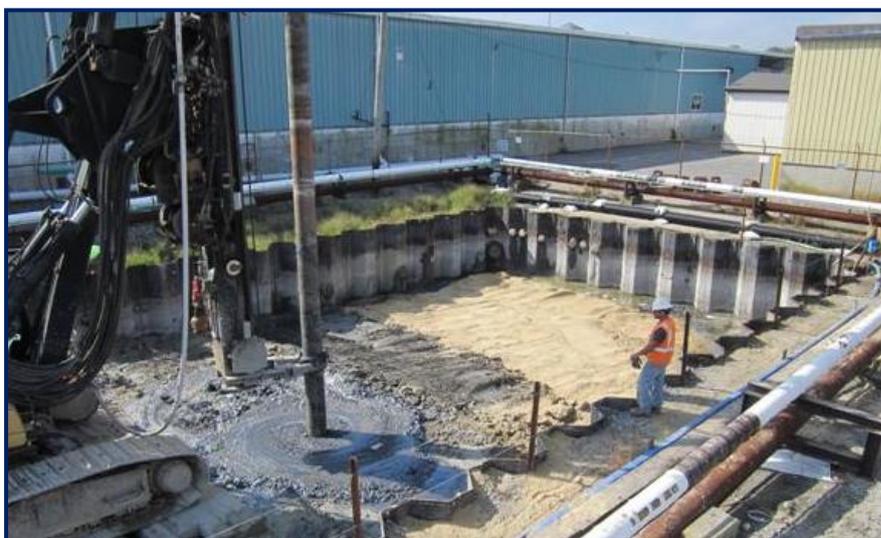


Figura 6.1: Aplicação da solidificação/estabilização na remediação de solos contaminados.

De: <http://www.geo-solutions.com/case-studies/soil-mixing/in-situ-stabilization-mgp-impacted-soils-massachusetts> (consultado a 16.10.2014).

- A vitrificação consiste no tratamento a altas temperaturas da área contaminada, com o objectivo de fundir o material contaminado e formar um material vítreo inerte, normalmente um óxido. Durante este processo, o aumento das temperaturas levam à volatilização de compostos orgânicos e espécies voláteis que existam na área, que devem ser recolhidas e depositadas em locais próprios. Este processo pode ser realizado *in situ* ou *ex situ*, no entanto é utilizado preferencialmente *in situ*, o que se relaciona com os menores custos associados. O processo *in situ* envolve a passagem de uma corrente eléctrica pelo solo, utilizando um conjunto de eléctrodos inseridos verticalmente na área contaminada, que levarão à fusão dos solos contaminados (Figura 6.2). É o seu arrefecimento e solidificação que imobiliza os elementos contaminantes (U.S.EPA, 1997; Wuana & Okieimen, 2011);

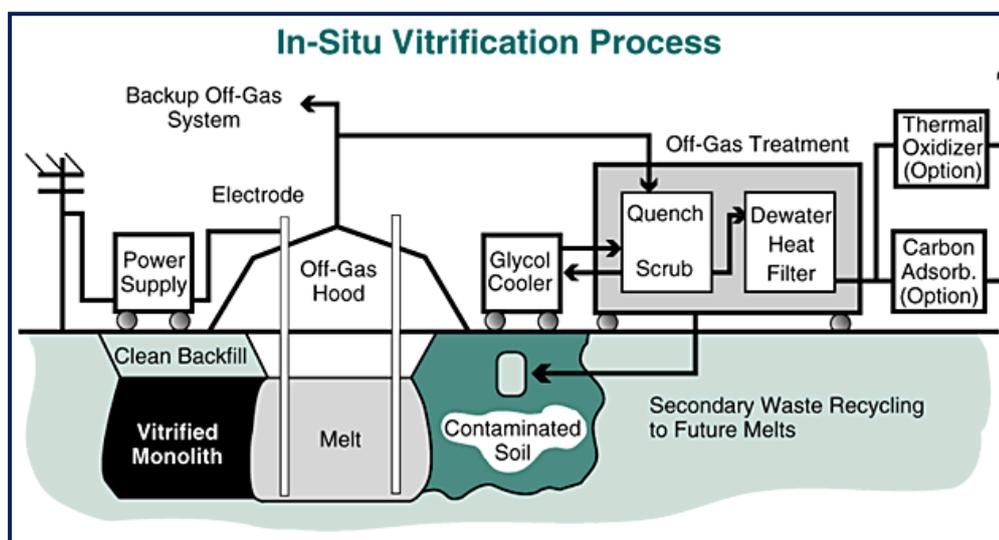


Figura 6.2: Processo de vitrificação *in situ*.

De: [http://infohouse.p2ric.org/ref/14/0\\_initiatives/init/feb95/isv.html](http://infohouse.p2ric.org/ref/14/0_initiatives/init/feb95/isv.html) (consultado a 16.10.2014).

- Os tratamentos químicos consistem na adição de agentes químicos a solos contaminados com o intuito de estabilizar os contaminantes através de processos de quelação, oxidação ou redução. Os tratamentos diferem conforme os elementos contaminantes, variando ainda a proporção de aditivo que deverá ser adicionada ao solo de forma que se verifiquem eficiências máximas. O maior problema associado a estes tratamentos consiste na determinação dos riscos ambientais associados à sua utilização, assim como a determinação de possíveis libertações de contaminantes por variações dos parâmetros físico-químicos (U.S.EPA, 1997; Wuana & Okieimen, 2011).

- O flushing do solo é uma técnica de extração *in situ* com acção de uma solução aquosa. Este processo consiste na utilização de água, uma solução aquosa de químicos ou um extractante orgânico para recuperar os contaminantes do material *in situ*. Os contaminantes são mobilizados por solubilização, formação de emulsões ou por reacções químicas por acção das soluções injectadas. Após a passagem pela zona contaminada, o fluido contendo os contaminantes é recolhido por furos estrategicamente posicionados ou trincheiras (Figura 6.3). A aplicabilidade desta técnica no solo depende da permeabilidade dos solos e na capacidade da solução lixiviar a área contaminada. Por isso, este método é aplicado a contaminantes que sejam relativamente solúveis no fluido utilizado e que não tendam a ficar adsorvidos nas partículas do solo (U.S.EPA, 1997).

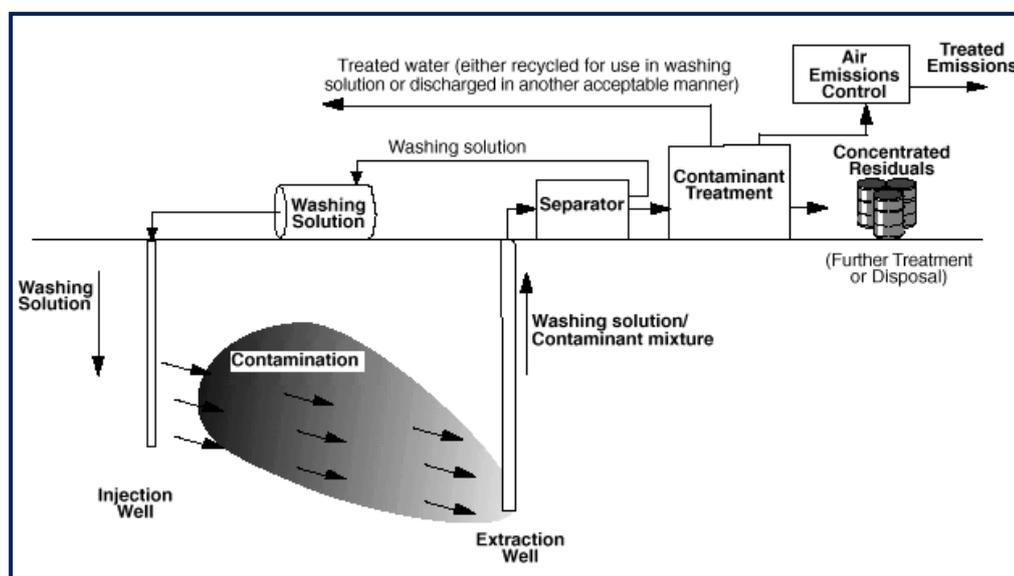


Figura 6.3: Processo de *flushing* do solo.

De: <http://infohouse.p2ric.org/ref/07/06188/> (consultado a 16.10.2014).

- A lavagem do solo é utilizada, essencialmente como um processo de tratamento de forma a minimizar o volume de resíduos a tratar. É tipicamente realizado em solos removidos (em tratamentos *ex situ*) mas também pode ser utilizado *in situ*. De uma forma geral, a lavagem do solo consiste na separação física das partículas que contêm contaminantes, na remoção por adição química aos contaminantes, seguida de recuperação da solução ou do substrato sólido ou uma combinação de ambas as metodologias (Figura 6.4). No entanto, e na maioria dos casos, as fracções contaminadas separadas têm como destino final a eliminação. A fracção separada não contaminada pode ser reutilizada como inerte para a cobertura, quer na área, quer noutros locais ou depositada como um material não perigoso, diminuindo

significativamente os custos. A lavagem do solo pode ser realizada com água, ou com uma mistura de surfactantes (agentes com actividade superficial), co-solventes, agentes quelantes ou ácidos orgânicos (U.S.EPA, 1997; Wuana & Okieimen, 2011).

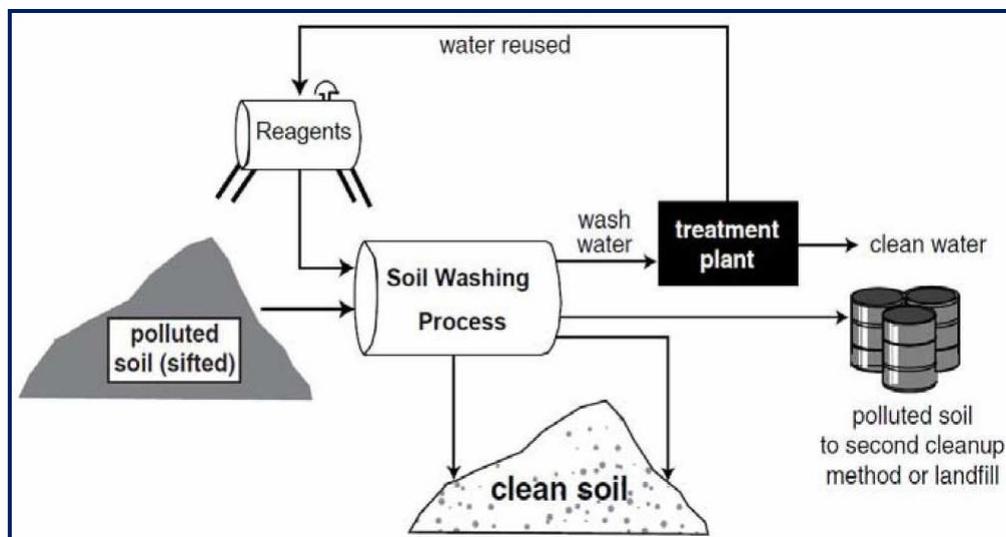


Figura 6.4: Processo de lavagem do solo.

De: <http://renewcanada.net/2010/scottish-scientists-export-remediation-tech/> (consultado a 16.10.2014).

- As tecnologias de contenção incluem a utilização de coberturas no solo e barreiras, horizontais e verticais. Estas têm como principal objectivo a limitação da infiltração da água superficial, quer à superfície, quer lateralmente (Figura 6.5). As principais vantagens na utilização de tecnologias de contenção consistem (1) na sua relativamente simples e rápida implementação, com baixos custos; (2) a possibilidade de implementação em áreas muito extensas e com elevados volumes de resíduos; e (3) na possibilidade de deposição à superfície de um solo não contaminado que suporte vegetação e que seja esteticamente apelativo. As suas limitações incluem o desconhecimento do seu tempo de vida útil, a não remoção dos contaminantes dos locais e a necessidade de manutenções e monitorizações a longo prazo (U.S.EPA, 1997).



Figura 6.5: Processo de cobertura de solos contaminados.

De: <http://www.goldsmith.com.au/projects/dandenongcalm.htm> (consultado a 16.10.2014)

- A desadsorção térmica é baseada na volatilidade dos poluentes e consiste no aquecimento do solo contaminado utilizando vapor, microondas ou radiação infravermelha de forma a volatilizar os contaminantes (Figura 6.6). No entanto, esta técnica pode apenas ser utilizada em contaminantes com baixo ponto de ebulição, sendo utilizado em compostos orgânicos e em elementos químicos como o arsénio ou o mercúrio que passam facilmente ao estado gasoso (Yao *et al.*, 2011);

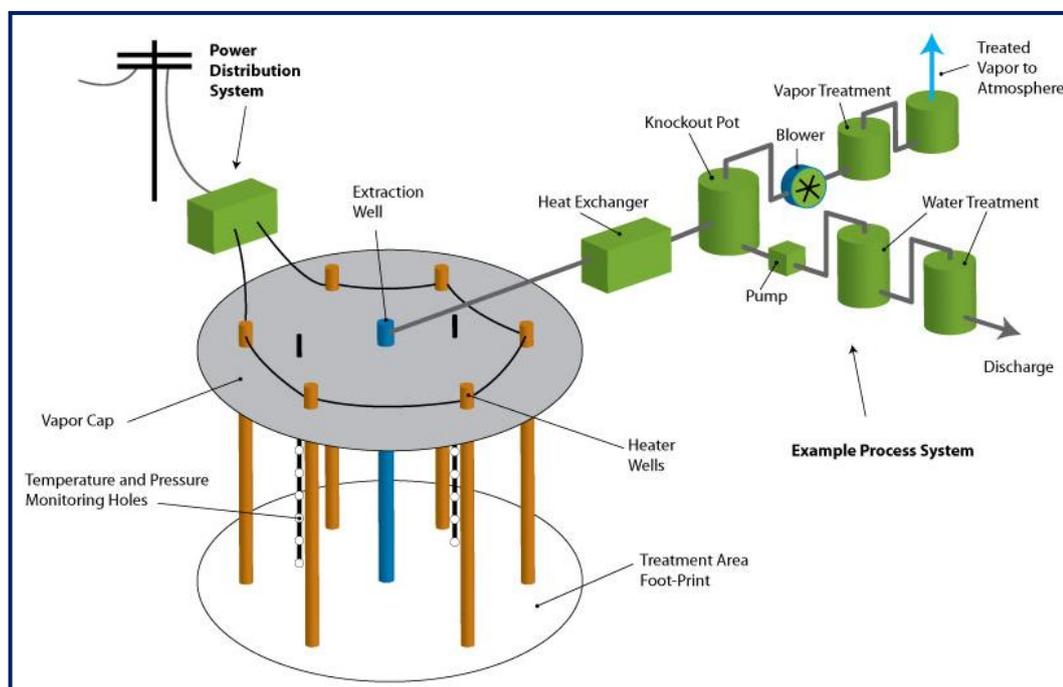


Figura 6.6: Processo de desadsorção térmica.

De: <http://www.terratherm.com/thermal/tch/index.htm> (consultado a 16.10.2014).

- O método de substituição do solo consiste na troca de parte do solo contaminado por solos limpos, com o objectivo de diluir a concentração dos contaminantes. Esta técnica pode ser

realizada pela simples substituição de solo contaminado com solos não contaminados, na escavação da área, permitindo a migração dos contaminantes para áreas mais profundas, o que leva à sua diluição e degradação natural ou cobertura da área contaminada por solos importados (Yao *et al.*, 2011);

- A remediação por electrocinese consiste na aplicação de uma corrente de baixa intensidade no solo, que tende a mobilizar espécies carregadas electricamente, causando a movimentação dos iões para os eléctrodos. Deste modo, iões metálicos, amónia e compostos orgânicos carregados positivamente movimentam-se para o cátodo, enquanto que os aniões cloreto, cianeto, nitrato e outros compostos orgânicos carregados negativamente movimentam-se para o ânodo (Figura 6.7). Esta tecnologia pode ser aplicada em solos, lamas e materiais sedimentares dragados, contaminados por metais pesados, iões e compostos orgânicos, sendo aplicada maioritariamente em solos com baixa permeabilidade. As suas limitações relacionam-se com a baixa percentagem de humidade relativa nos materiais contaminados (inferior a 10%), a sua pouca eficiência em áreas que apresentem elevadas condutividades eléctricas e a necessidade de utilização de eléctrodos inertes (de carbono, grafite ou platina) e não metálicos, para que não ocorra dissolução por electrólise durante o processo de remediação (*Federal Remediation Technologies Roundtable*);

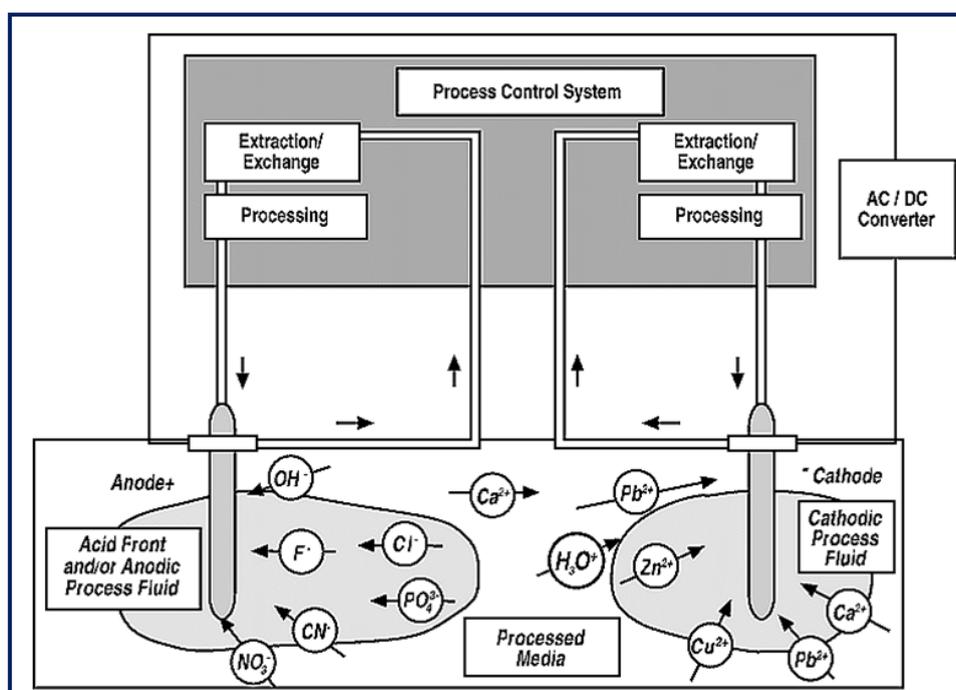


Figura 6.7: Processo de electrocinese.

De: <http://www.responsiblebusiness.eu/display/rebwp8/Electrokinetic+Separation> (consultado a 16.10.2014).

- As nanopartículas de ferro zero valente, reconhecidas na literatura como *nano zero valent iron* (nZVI) são uma nova opção para o tratamento de solos e águas contaminados. Devido à sua pequena dimensão e à sua capacidade redutora, são altamente reactivas podendo ser utilizadas no tratamento *in situ* de áreas contaminadas. As principais vantagens associadas às nZVI relacionam-se com a sua rápida reacção, o que permite a diminuição dos custos associados à duração do tratamento da área e minimiza a exposição de elementos tóxicos quer a trabalhadores, quer ao meio físico. Outra vantagem é a redução completa dos contaminantes, a formação de produtos finais não tóxicos e a possibilidade de tratamento *in situ*, o que implica a diminuição de custos associados à remoção do material contaminado, aos equipamentos contratados e a estruturas físicas construídas. As principais limitações que estão associadas à utilização de nZVI relacionam-se com (1) a sua estabilidade, visto serem facilmente oxidadas em contacto com o ar atmosférico; (2) a sua mobilidade, pois estas partículas tendem a aglomerar-se e aderir às partículas do solo, diminuindo a sua dispersão; e (3) as incertezas acerca do impacte ambiental associado à utilização em larga escala desta tecnologia (Zhang, 2003; Li *et al.*, 2006; U.S.EPA, 2008; Müller & Nowack, 2010).

Os métodos físico-químicos possuem normalmente um custo mais elevado e podem provocar uma maior exposição ambiental do material contaminado, enquanto que a fitorremediação (como técnica biológica mais utilizada) possui um custo mais acessível, um baixo impacte ambiental e estética mais favorável, protegendo ainda contra a erosão eólica e hídrica, no entanto, as condições da sua aplicabilidade são mais restritas, dependendo de parâmetros como o clima, o tipo de contaminação, ou os parâmetros físico-químicos do solo (Zeitouni *et al.*, 2007; Marques *et al.*, 2009; Borin, 2010; Chaves *et al.*, 2010; França, 2011; Almeida, 2012).

Como já foi referido, a fitorremediação pode ser realizada de quatro formas (Pivetz, 2001; Marques *et al.*, 2009):

- Por degradação dos contaminantes, por rizodegradação ou fitodegradação;
- Por acumulação, por fitoextração ou rizofiltração;
- Por dissipação, através da fitovolatilização;
- Por imobilização, por controlo hidráulico ou fitoestabilização.

Tendo em conta as características dos solos e a natureza da contaminação já discutidas anteriormente, sugere-se, para a área em estudo, a utilização de dois métodos principais: a fitoextração e a fitoestabilização.

Deste modo, de forma a compreender a possibilidade da implementação da fitorremediação na área em estudo, foram realizados alguns testes de fertilidade ao solo, relacionados com a biodisponibilidade de alguns nutrientes, tendo estes sido comparados com valores de referência (ver Discussão).

Paralelamente realizaram-se ainda pesquisas bibliográficas acerca de plantas endêmicas à região, e pertencentes à flora característica do Cerrado, passíveis de tolerar os elevados teores de metais pesados identificados na área. Para além disso, a sua utilização diminui o desenvolvimento de outras espécies estranhas ao local, que poderão ser infestantes neste ambiente, e poderão por em causa a qualidade ecológica regional. Preferencialmente em estudos de fitorremediação, devem ser utilizadas plantas encontradas no local que pelo simples facto de proliferarem, significa que já se encontram ambientadas quer ao clima, quer aos parâmetros físico-químicos do solo, quer às elevadas concentrações de metais pesados (Oliveira *et al.*, 2009; Borin, 2010).

Para a determinação das espécies ideais para fitorremediação em qualquer área contaminada, é necessário que estas, para além de serem passíveis de sobreviver e proliferar em solos com elevados teores em elementos contaminantes, que os possam extrair eficazmente do solo e acumulá-los nas suas partes aéreas, e que possuam elevada biomassa passível de ser podada e eliminada conjuntamente aos elementos contaminantes (Almeida, 2012). Este material biológico rico em metais pesados ou outros contaminantes não metálicos, terá posteriormente de ser disposto em aterro, de forma a que a sua decomposição não volte a contaminar os solos, ou valorizado para a produção de biocombustíveis, ou como fonte para a extracção de metais pesados (de Abreu *et al.*, 2012).

A fitoextracção consiste na absorção destes elementos através das raízes das plantas e consequente acumulação na parte aérea da planta (Pivetz, 2001). Estas espécies, fitoextractoras ou fitoacumuladoras, podem ser hiperacumuladoras se tiverem a capacidade de acumular e suportar grandes concentrações de metais. Uma espécie vegetal é considerada hiperacumuladora, se for capaz de reter 10.000 ppm de zinco ou manganês, 1.000 ppm de chumbo, cobre ou níquel ou 100 ppm de cádmio (Zeitouni *et al.*, 2007; Almeida, 2012), cuja concentração pode ser ampliada pela aplicação de agentes quelantes, como o DTPA ou o EDTA (Almeida, 2012).

A Tabela 6.1 consiste numa compilação de espécies vegetais com capacidades acumuladoras dos principais elementos contaminantes na área em estudo e passíveis de serem adequadas aos parâmetros físico-químicos e condicionantes ambientais e climáticos vigentes na área em estudo.

Entre elas destacam-se a *Pityrogramma calomelanos*, *Pteris Vittata*, *Pfaffia* sp. e a *Gomphrena clausenii* pela sua capacidade hiperacumuladora, onde se destacam a *Pfaffia* sp. e a *Gomphrena clausenii* por, para além de possuírem capacidades hiperacumuladoras de metais, também são endêmicas ao bioma do Cerrado; destacam-se ainda a *Galianthe grandifolia*, *Handroanthus impetiginosus*, *Gomphrena globosa* e *Cidrela fissilis*, por serem espécies endêmicas do Cerrado com capacidade fitoacumuladora.

**Tabela 6.1: Espécies com capacidades fitoextractoras passíveis de serem utilizadas na área em estudo. Os elementos hiperacumulados pelas espécies vegetais encontram-se seleccionados a negrito.**

Fitoextração		
Espécie	Contaminante	Referência
<i>Pityrogramma calomelanos</i>	<b>As</b>	Francesconi <i>et al.</i> (2002); Gonzaga <i>et al.</i> (2006)
<i>Pteris Vittata</i>	<b>As</b>	Gonzaga <i>et al.</i> (2006)
<i>Stylosanthes humilis</i>	As	Melo <i>et al.</i> (2009)
<i>Galianthe grandifolia</i>	Cd	Santos (2008)
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Cd	Paiva <i>et al.</i> (2004)
<i>Pfaffia</i> sp.	<b>Cd, Zn</b>	Carneiro <i>et al.</i> (2002)
<i>Solanum nigrum</i> L.	<b>Cd, Zn</b>	Wei <i>et al.</i> (2005); Sun <i>et al.</i> (2007)
<i>Bracchiaria decumbens</i>	Cu	Andreazza <i>et al.</i> (2013)
<i>Cidrela fissilis</i>	Cu	Silva (2007)
<i>Alyssum bertolonii</i>	Ni	Li <i>et al.</i> (2003)
<i>Brassica juncea</i>	<b>Pb</b>	Dutton (1996)
<i>Canavalia ensiformis</i>	<b>Pb</b>	Romeiro (2000); Gabos <i>et al.</i> (2009)
<i>Cyperus rotundus</i> L.	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Cyperus sesquiflorus</i>	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Eleocharis filiculmis</i> kunth	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Eucaliptus</i> spp	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Imperata brasiliensis</i>	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Philodendron bipinnatifidum</i> schott	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Pteridium aquilinum</i>	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Pterocaulon virgatum</i> DC.	<b>Zn</b>	Costa <i>et al.</i> (2008)
<i>Ricinus communis</i> L.	Zn	Chaves <i>et al.</i> (2010)
<i>Gomphrena clausenii</i>	<b>Zn, Cd</b>	Carvalho <i>et al.</i> (2013)
<i>Gomphrena globosa</i>	Zn, Cd	França (2011)
<i>Nicotiniana tabacum</i>	Zn, Cd	Zeitouni (2003)

Por sua vez, a fitoestabilização consiste na contenção dos contaminantes *in situ* através da modificação das condições biológicas, físicas e químicas do solo (Pivetz, 2001). Assim, para que uma espécie vegetal possa ser fitoestabilizadora na área em estudo, terá apenas de ser capaz de se desenvolver e proliferar em solos com elevados teores de metais pesados e suportar as condições físico-químicas presentes na área em estudo, nomeadamente o pH, o tipo de solo e as condições climáticas. Deste modo, apresenta-se na Tabela 6.2 uma listagem de espécies vegetais que poderão ser possíveis fitoestabilizadoras na área em estudo. Para além das espécies listadas nesta Tabela, também as presentes na Tabela 6.1 têm capacidade fitoestabilizadora, no entanto, possuem para além disso, capacidade de remoção dos contaminantes do solo. Entre estas espécies fitoestabilizadoras destacam-se *Peltophorum dubium*, *Enterolobium contortisiliquum* e *Hymenaea courbaril*, por serem espécies vegetais endémicas ao bioma do Cerrado, e *Cidrela fissilis* e *Handroanthus impetiginosus*, espécies também endémicas do Cerrado, que para além de possuírem alguma capacidade fitoextractora, possuem uma grande capacidade fitoestabilizadora (Marques *et al.*, 2000; Caires *et al.*, 2011; Soares *et al.*, 2011).

Tabela 6.2: Espécies com capacidades de fitoestabilização passíveis de serem utilizadas na área em estudo.  
N.R. não referido.

Fitoestabilização		
Espécie	Tolerante a	Referência
<i>Ricinus communis</i>	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Chaves <i>et al.</i> (2010)
<i>Eugenia dysenterica</i>	N.R.	França (2011)
<i>Inga vera</i>	N.R.	França (2011)
<i>Acacia mangium</i>	Cd, Zn	Marques <i>et al.</i> (2000); Soares <i>et al.</i> (2001)
<i>Copaifera langsdorffii</i>	Cd, Zn	Marques <i>et al.</i> (2000); Soares <i>et al.</i> (2001)
<i>Peltophorum dubium</i>	Cu	Silva (2007)
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	Cu	Silva (2007)
<i>Brassica</i> sp.	N.R.	Soares <i>et al.</i>
<i>Cenchrus ciliaris</i>	N.R.	Soares <i>et al.</i>
<i>Philodendron maximum</i>	N.R.	Soares <i>et al.</i>
<i>Andropogon gayanus</i>	N.R.	Soares <i>et al.</i>
<i>Cyperus rotundus</i>	N.R.	Soares <i>et al.</i>
<i>Merremia umbellata</i>	N.R.	Marques <i>et al.</i> (2000)
<i>Hymenaea courbaril</i>	N.R.	Marques <i>et al.</i> (2000)
<i>Mimosa caesalpiniaefolia</i>	N.R.	Marques <i>et al.</i> (2000)
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	N.R.	Marques <i>et al.</i> (2000)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	N.R.	Gomes <i>et al.</i> (2012)
<i>Eucalyptus grandis</i>	N.R.	Melo <i>et al.</i> (2010)

Nos solos da área em estudo, a fitorremediação apenas poderá ser implementada nas zonas mais secas devido às características inerentes ao clima da região. Portanto, não serão discutidas formas de remediação dos solos da área A1, que poderão ser englobados em futuras remediações do córrego Consciência e dos seus materiais sedimentares. Deste modo, e tendo como áreas de acção as áreas A3, A4 e A5, serão os seus principais contaminantes que ditarão as espécies vegetais que poderão ser utilizadas, e se encontram ilustradas na Figura 6.8.

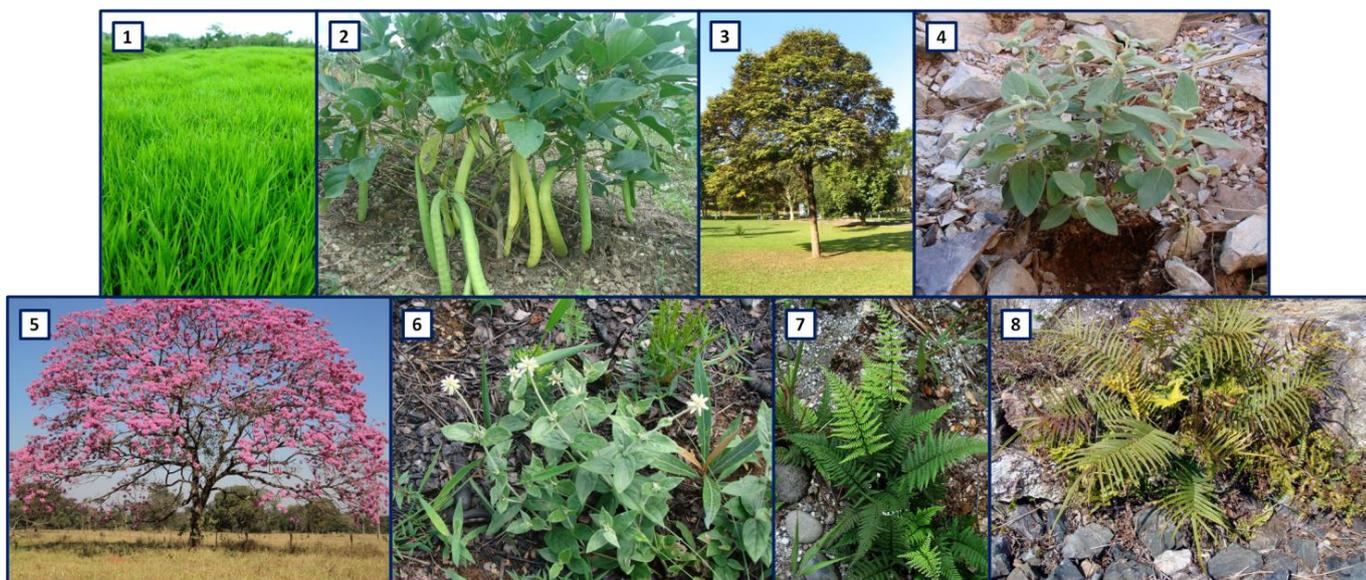


Figura 6.8: Espécies vegetais escolhidas para a fitoextração e fitoestabilização da área.

1. *Brachiaria decumbens*. Adaptado de: <http://www.culturaempresarialganadera.org/photo/brachiaria-decumbens>
2. *Canavalia ensiformis*. Adaptado de: <http://tanamankoropedang.wordpress.com/>
3. *Cidrela fissilis*. Adaptado de: <http://risk.forestlegality.org/species/cedrela-fissilis>
4. *Gomphrena clausenii*. Adaptado de: <http://phys.org/news/2013-06-south-american-purifying-soils-contaminated.html>
5. *Handroanthus impetiginosus*. Adaptado de: [http://soscerradogo.blogspot.pt/2010/09/blog-post\\_09.html](http://soscerradogo.blogspot.pt/2010/09/blog-post_09.html)
6. *Pfaffia* sp.. Adaptado de: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pfaffia>
7. *Pityrogramma calomelanos*. Adaptado de: [http://www.plantsystematics.org/imgs/robbin/r/Pteridaceae\\_Pityrogramma\\_calomelanos\\_10869.html](http://www.plantsystematics.org/imgs/robbin/r/Pteridaceae_Pityrogramma_calomelanos_10869.html)
8. *Pteris vittata*. Adaptado de: <http://fern.la.coocan.jp/Pteridaceae/Pteris%20vittata/Pteris%20vittata.htm>

Na área A3 identificam-se elevados teores em arsénio, cádmio, cobre, chumbo e zinco. Deste modo, e tendo em conta que a natureza dos solos da área não permite o desenvolvimento de espécies vegetais de grande porte, optou-se pela escolha da implementação da *Pteris vittata* (por se desenvolver em áreas rochosas e não precisar de solos muito espessos para o seu estabelecimento) e da *Pityrogramma calomelanos* (por ser uma espécie brasileira) para a extração de arsénio. Para a extração conjunta de cádmio e zinco indicam-se a *Pfaffia* sp. e a *Gomphrena clausenii*, ambas endémicas do bioma Cerrado e hiperacumuladoras de um dos elementos e acumuladoras do outro. Para a fitoextração de cobre indica-se a *Brachiaria decumbens*, já utilizada em outros testes de fitorremediação da área em estudo (França, 2011). Para o chumbo indica-se também uma espécie brasileira, a *Canavalia ensiformis*.

A área A4 encontra-se essencialmente contaminada em cádmio, chumbo e zinco. Deste modo, e porque para além de se pretender a extracção dos elementos contaminantes também ser importante estabilizar os terrenos e impedir que a contaminação se alastre, para além de espécies fitoextractoras, também se procedeu à escolha de espécies fitoestabilizadoras. Deste modo, para a extracção de cádmio e zinco, indicam-se à semelhança da área A3, a *Pfaffia* sp. e a *Gomphrena clausenii*. O chumbo também poderá ser extraído através da acumulação pela acção da *Canavalia ensiformis*. Para a estabilização da área e para o impedimento da lixiviação destes elementos para outras áreas, indicam-se o *Handroanthus impetiginosus* e a *Cidrela fissilis* que, para além de serem espécies fitoestabilizadoras possuem características acumuladoras em cádmio e cobre, respectivamente.

A área A5, de acordo com a distribuição dos contaminantes, pode ser dividida em duas zonas: uma próxima à unidade industrial, onde se encontravam os antigos depósitos de resíduos, mais contaminada em metais pesados, e outra mais próxima ao córrego Barreiro Grande, menos inclinada e menos contaminada. De acordo com a própria morfologia do terreno e os contaminantes encontrados, também a remediação destas zonas deverá ser diferente.

Na zona mais próxima ao córrego Barreiro Grande, os contaminantes identificados são o cádmio e o zinco. No entanto, tendo em conta a localização desta zona e as características climáticas da área, torna-se imprescindível estabilizar o solo, de modo a impedir a remoção do solo e a contaminação do córrego. Deste modo, para a fitoextracção indicam-se as já referidas *Pfaffia* sp. e a *Gomphrena clausenii* para a remoção do cádmio e zinco. Para a fitoestabilização, podem utilizar-se espécies de médio porte como a *Bracchiaria decumbens* ou de grande porte, como o *Handroanthus impetiginosus* ou a *Cidrela fissilis*.

Na zona mais próxima à unidade industrial, identificam-se um maior número de contaminantes, nomeadamente, o arsénio, o cádmio, o cobre, o chumbo e o zinco. De modo a homogeneizar a área em estudo, optou-se por não escolher outras espécies vegetais, que poderiam não estar tão aptas a sobreviver na área. Assim, e à semelhança do que foi indicado para fitorremediação nas restantes áreas nomeiam-se as espécies *Pteris Vittata* e *Pityrogramma calomelanos* (para extracção de arsénio), *Pfaffia* sp. e *Gomphrena clausenii* (para extracção de cádmio e zinco), *Canavalia ensiformis* (para o chumbo) e a *Bracchiaria decumbens* e *Cidrela fissilis* (para a extracção de cobre). Nesta zona, por ser mais inclinada, é necessária a utilização de outras técnicas de Engenharia natural, que auxiliem a estabilização do terreno para a implementação destas espécies vegetais, discutidas seguidamente.

Para que a fitorremediação seja bem sucedida tendo em conta as limitações que a área em estudo apresenta, podem paralelamente ser implementadas algumas técnicas de Engenharia Natural, que não só auxiliam a fixação radicular das espécies vegetais, mas também a estabilização das vertentes e uma diminuição de efeitos nefastos das enxurradas, comuns na época das chuvas. A Engenharia Natural pode ser definida, segundo Fernandes & Freitas (2011), como o ramo da Engenharia que tem como objecto o território e que procura otimizar os processos construtivos numa perspectiva de funcionalidade estrutural e ecológica. Deste modo, as intervenções de Engenharia Natural são para além de funcionais em termos de uso, harmoniosas no espaço natural, sendo para tal utilizados os próprios sistemas naturais (Fernandes & Freitas, 2011).

Entre as inúmeras técnicas de Engenharia Ambiental destacam-se (Fernandes & Freitas, 2011):

- A hidrosementeira, um processo relativamente barato e rápido, que consiste em aspergir sementes, ou uma mistura de sementes, fertilizante, agregante, uma cultura de bactérias, palha triturada, juntamente com água sobre o solo nu (Figura 6.9).

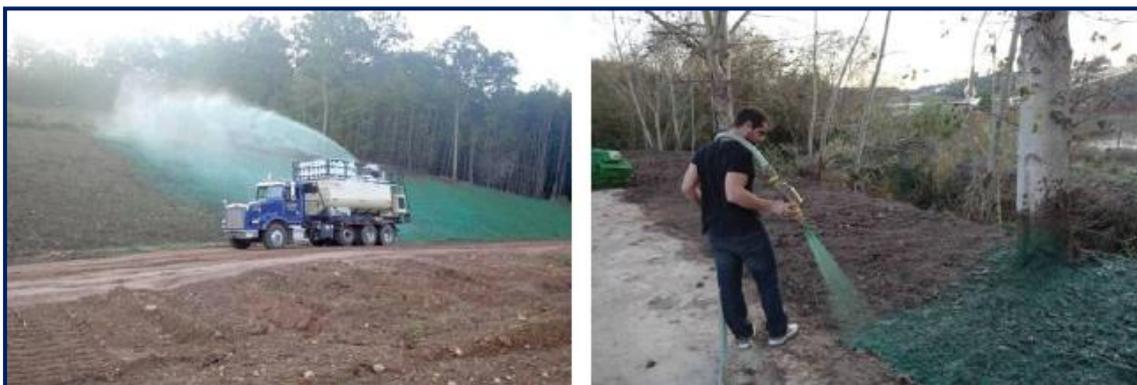


Figura 6.9: Utilização de hidrosementeira.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- A hidrosementeira com *mulch* de palha ou feno consiste num processo semelhante ao anterior, em que se juntam num misturador sementes, adubo, fertilizantes, agregantes e água até se obter uma mistura densa que é aspergida sobre o solo nu. Para combater a erosão superficial, lança-se sobre a superfície *mulch* (matéria vegetal, nomeadamente folhas, cascas de árvores ou compostos), de forma a enriquecer o solo e a protegê-lo contra erosão superficial e fixa-se com agregantes.

- A sementeira manual com cobertura de *mulch* de palha ou feno é utilizada na revegetação de zonas extremas e/ou terrenos inacessíveis, sendo fixada com emulsões estáveis de betume frio. De forma a auxiliar a fixação ao terreno podem utilizar-se ainda arame, ramagens e/ou redes sintéticas (Figura 6.10).



Figura 6.10: Sementeira manual com cobertura de *mulch*.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- A sementeira sob rede ou geotêxtil é utilizada em zonas de elevado risco de erosão, consistindo na cobertura das novas sementeiras com geotêxteis ou redes metálicas, que deverão aderir bem ou serem fixadas ao terreno. Estas coberturas não são biodegradáveis e, portanto, deverão ser removidas após a germinação das espécies vegetais (Figura 6.11).

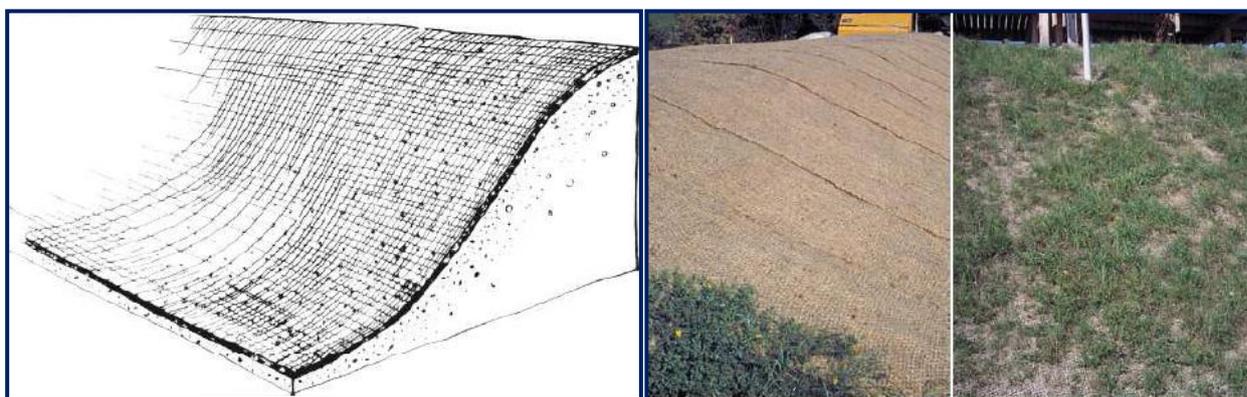


Figura 6.11: Sementeira sob rede ou geotêxtil.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- A utilização de entrançados vivos em malha diagonal permite a estabilização de encostas e a retenção da camada mais superficial de solo de modo a favorecer o revestimento arbustivo. Consiste na construção de entrançados diagonais, conforme mostra a Figura 6.12 e procede-se ao enchimento com terra vegetal. Podem utilizar-se entrançados pré-fabricados, ramos vivos ou mortos de espécies vegetais com capacidade de propagação vegetativa.

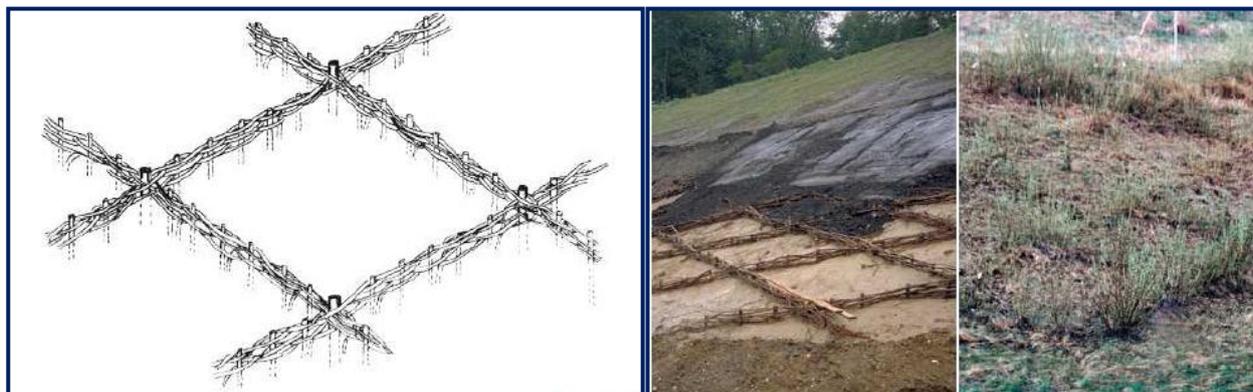


Figura 6.12: Entrançados vivos em malha diagonal.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- As faxinas vivas são utilizadas na estabilização de margens de linhas de água, sendo um método eficaz quer à superfície, quer em profundidade. Em margens erosivas podem utilizar-se para além das faxinas, ramos de espécies com capacidade vegetativa fixados conjuntamente a estacas (Figura 6.13).

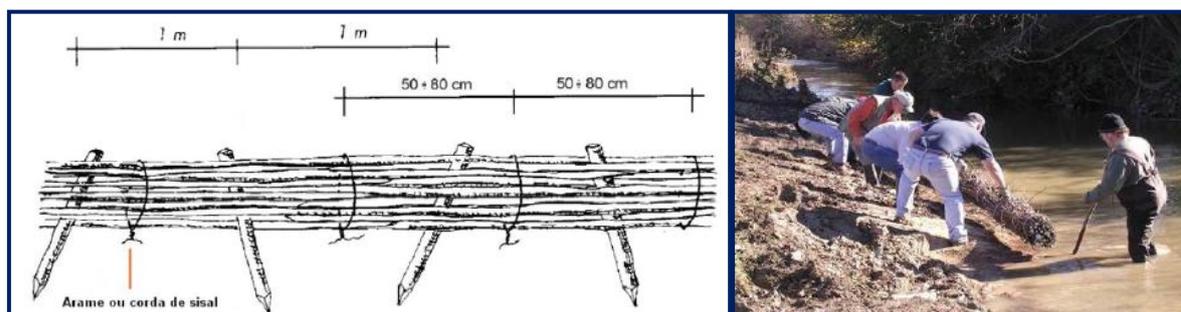


Figura 6.13: Faxina viva na estabilização de uma margem fluvial.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- Além de margens fluviais, as faxinas vivas também podem ser utilizadas em encostas. Assim, para favorecer a drenagem terão de ser abertas valas (com cerca de 30 a 50 cm de profundidade), onde são colocadas faxinas vivas cravadas com estacas e cobertas superficialmente com solo (Figura 6.14).

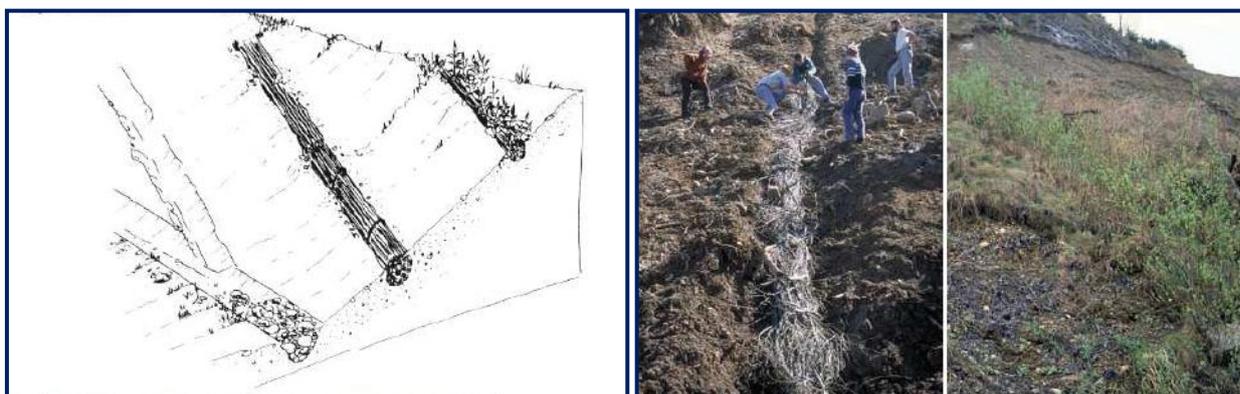


Figura 6.14: Faxinas vivas na estabilização de encostas.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- Zonas ravinosas podem ser consolidadas com ramagem viva, de modo a impedir o avanço da erosão em profundidade. As ravinas são revestidas progressivamente com estacas vivas ou mortas de espécies com capacidade de propagação vegetativa. Para favorecer o enraizamento poderá ser necessário recobrir com solo vegetal (Figura 6.15).

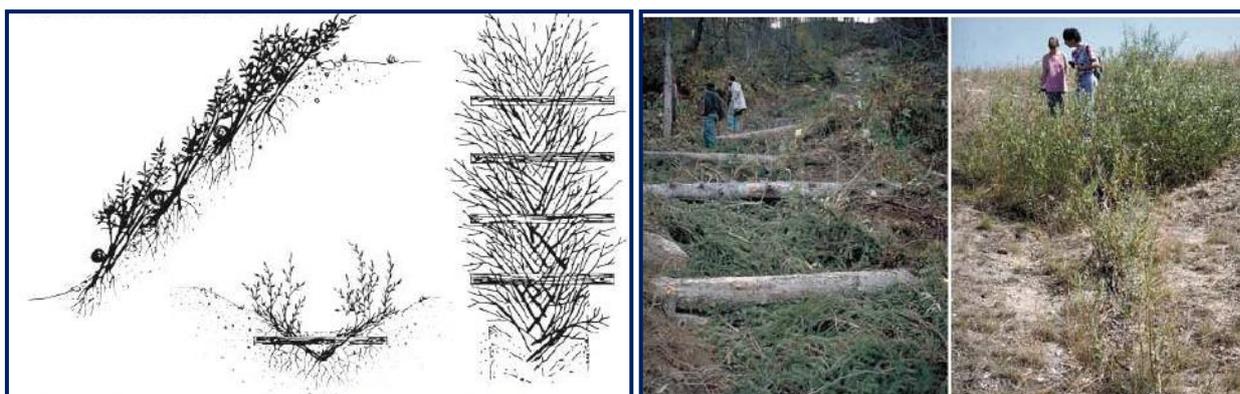


Figura 6.15: Ramagem viva em zonas ravinosas.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- Na consolidação de taludes ou para a defesa de margens fluviais podem ser utilizados muros de suporte vivo em madeira tipo Cribwall. Este consiste num muro de estrutura simples ou dupla, em madeira, em que durante o enchimento são inseridas estacas vivas ou plantas lenhosas enraizadas. Estas devem ser colocadas de forma a sobressair do muro e percorrê-lo até atingir terreno natural, conforme ilustra a Figura 6.16.

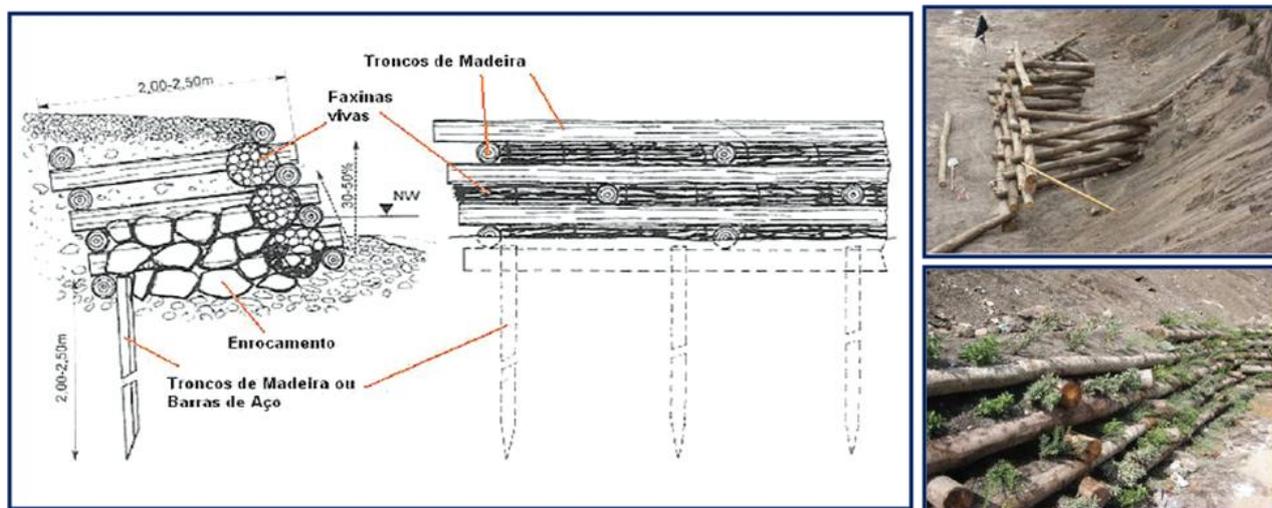


Figura 6.16: Muros de suporte vivo em madeira tipo *Cribwall*.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- Para a consolidação de encostas podem ainda ser construídos degraus vivos. A sua implementação consiste na sobreposição de um ou dois troncos de madeira por trás de fortes estacas verticais cravadas no terreno. Nestes terraços colocam-se alternadamente ramos vivos de espécies vegetais com capacidade de propagação vegetativa e plantas em torrão (Figura 6.17).

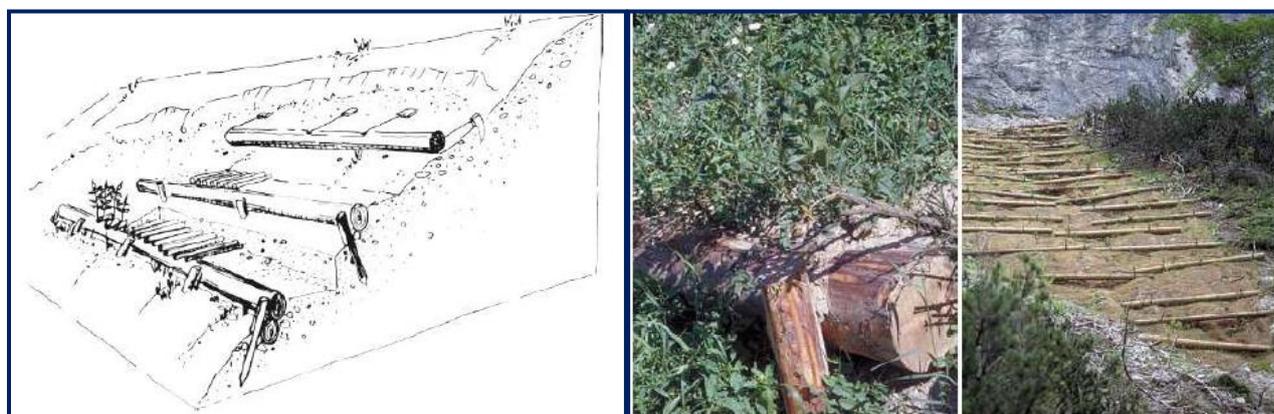


Figura 6.17: Degraus vivos.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- Em declives íngremes podem ainda ser utilizadas grades vivas. Utilizam-se grades de madeira, de parede simples ou dupla, fixas com pregos ou outro tipo de ancoragem. As grades são preenchidas com solo e são inseridas faixas de vegetação com ramos, plantas em torrão ou transplantadas e/ou semeadas posteriormente (Figura 6.18);

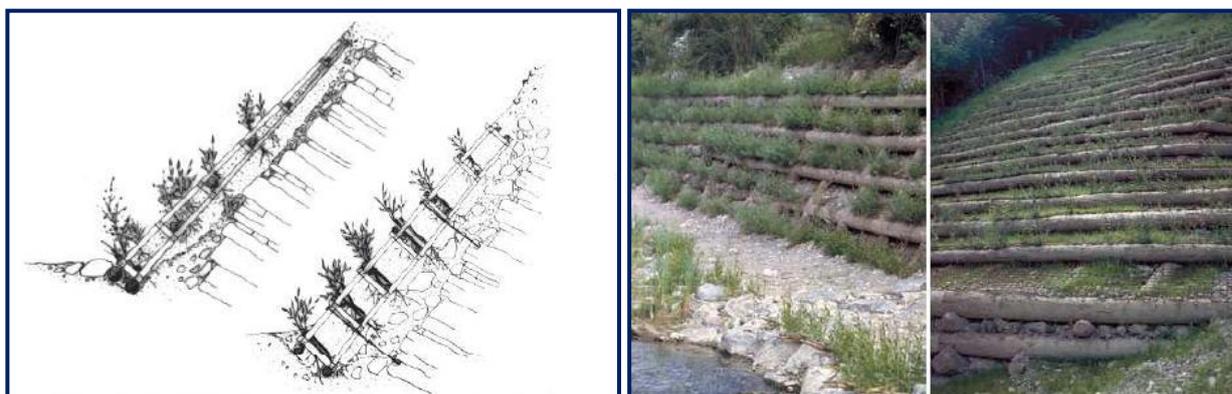


Figura 6.18: Grade viva.  
De Fernandes & Freitas (2011).

- As células sintéticas em favo de mel são utilizadas na estabilização de taludes com fraca cobertura vegetal ou materiais não consolidados. Trata-se de um revestimento que utiliza uma estrutura sintética constituída por células hexagonais com aspecto de favo de mel. As células individuais são totalmente preenchidas por solo e semeadas, como ilustra a Figura 6.19.

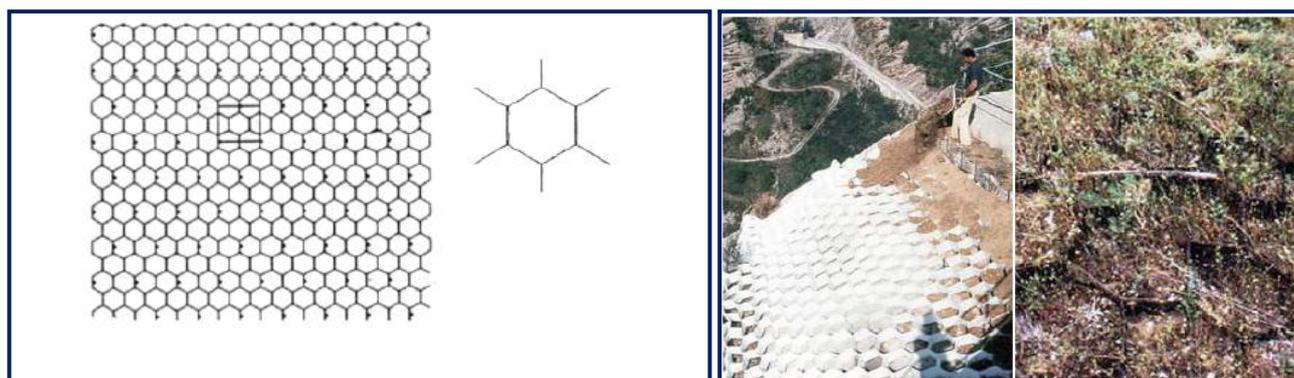


Figura 6.19: Células sintéticas em favo de mel.  
De Fernandes & Freitas (2011).



## **7. Conclusões**



## Conclusões

A contaminação dos solos por elementos metálicos é um problema global e deve-se a actividades antrópicas essencialmente associadas à indústria e/ou à exploração mineira. Por outro lado, o solo é um dos componentes mais importantes da biosfera, com o qual se interligam a hidrosfera, a atmosfera e os seres vivos, servindo de base para o sustento das suas necessidades mais básicas, como o alimento. Por esta razão, é necessário criar soluções, que não comprometam a integridade ambiental nem o desenvolvimento e crescimento económico local.

É neste âmbito que surge este trabalho. A área em estudo possui um historial de contaminação com mais de quarenta anos, onde foram cometidos muitos erros de eliminação dos resíduos do seu funcionamento nos solos da envolvente da unidade industrial. São, portanto, objectivos deste trabalho, não só definir a área contaminada e os principais elementos contaminantes, como também estudar a possibilidade de implementação de fitorremediação como técnica de remediação dos solos da área em estudo.

Deste modo, e para poderem ser determinados os principais contaminantes da área, assim como definir a extensão e profundidade contaminadas, foram realizadas amostragens locais sobre a área a diferentes profundidades. Todas estas amostras foram divididas por áreas, algumas onde já tinham sido realizados ensaios-piloto de fitorremediação (França, 2011).

Em todas estas amostras procedeu-se à sua digestão parcial (remoção por adição por mistura de ácidos das fracções ligadas a todas as fases orgânicas e minerais excepto a silicatos) de forma a se avaliar o grau de contaminação dos solos existentes em áreas previamente seleccionadas como áreas contaminadas, através de estudos anteriores (Golder Associates, 2007b). Por análise destes dados identificaram-se como maiores contaminantes, o cádmio e o zinco, verificando-se ainda contaminações de carácter pontual associados ao arsénio, ao cobre e ao chumbo. Estes contaminantes foram também identificados por cálculo do Factor de Enriquecimento, do Índice de Geoacumulação e do Factor de Contaminação. O Factor de Enriquecimento dá-nos um enriquecimento num dado elemento, padronizado com a concentração em ferro, em comparação com os valores *background* locais, dando-nos um valor relativo do grau de contaminação. O Índice de Geoacumulação permite uma comparação directa com os valores *background*, no entanto, o elevado número de categorias não permite uma rápida caracterização da área. Para tal, foi

calculado o Factor de Contaminação, um factor mais simples, mas que fornece uma informação para toda a área, relativamente aos mesmos valores *background*.

Por muito que os valores relativos à digestão parcial sejam muito importantes e úteis para a caracterização e quantificação da contaminação da área em estudo, foram realizados, para algumas amostras, extracções sequenciais, de forma a se determinar que concentrações dos elementos metálicos se encontram associadas à fracção mais solúvel e biodisponível no meio, ligados a óxidos de manganês, ligados a óxidos de ferro amorfos, ligados a matéria orgânica e parcialmente a sulfuretos, e ligados a óxidos de ferro cristalinos. A análise destes dados permite determinar quais os contaminantes ambientalmente mais perigosos por serem mais facilmente lixiviáveis. Deste modo, identificam-se como elementos mais solúveis e biodisponíveis o cádmio e o zinco. Verificam-se para o cobre e o chumbo pontos com elevada fracção solúvel, embora em algumas amostras se associem a formas minerais mais estáveis, o cobalto surge preferencialmente associado aos óxidos de manganês, o manganês ocorre maioritariamente sob a forma de óxido e o ferro e o níquel associam-se essencialmente a fracções mais estáveis.

Tendo presente os principais elementos contaminantes e aqueles ambientalmente mais perigosos optou-se pela realização de ensaios de lixiviação, de modo a compreender entre estas fracções muito solúveis, quais seriam lixiviáveis por agitação com água. Para tal, e utilizando água ultrapura com pH ajustado ao pH das chuvas locais, verificou-se que, por comparação com a fracção mais solúvel da extracção sequencial (obtida por agitação com acetato de amónio), o cádmio, o cobre e o zinco apresentam valores muito elevados, o que demonstra a sua elevada solubilidade mesmo em água. No entanto, e de modo geral, as concentrações lixiviadas são baixas, notando-se uma certa imobilidade dos restantes elementos em água, o que se deve ao valor de pH superior em comparação com o acetato de amónio utilizado na primeira fase de extracção sequencial, não sendo muito provável a extracção destes elementos dos solos por acção das chuvas.

Para determinar a possibilidade de implementação de fitorremediação na área realizaram-se alguns testes de forma a identificar a concentração de nutrientes nas amostras de solos.

Primeiramente determinaram-se os valores de pH dos solos. Este é um processo relativamente simples e rápido que pode permitir identificar zonas contaminadas por comparação com os valores normais nestes tipos de solo. Deste modo, verificam-se valores óptimos ou até elevados de pH, quando comparados aos limites mais adequados para uso agrícola, propostos por Brady & Weil *in* Brown (2011). Estes valores encontram-se, assim, muito acima do que seria de esperar tendo em

conta a natureza ácida dos solos do tipo Latossolo, que dominam a área em estudo, e poderão dever-se à contaminação local.

Foram ainda determinadas as concentrações de carbono, azoto e enxofre por análise elementar, verificando-se teores relativamente baixos destes elementos. Verificou-se ainda que as concentrações mais elevadas se encontram à superfície para o carbono e o azoto, o que é expectável tendo em conta que é nas camadas mais superficiais que se encontram as maiores acumulações de material orgânico. Relativamente ao enxofre, verifica-se um aumento da sua concentração em profundidade, o que se poderá dever à natureza sulfuretada da maioria do minério explorado nesta unidade industrial e à sua posterior oxidação química com produção de elevados teores de sulfatos. Dada a elevada solubilidade dos aniões sulfato, estes tendem a infiltrar-se, acumulando-se nas zonas mais profundas dos perfis.

Determinaram-se ainda as concentrações em fósforo. Por comparação dos valores totais e assimiláveis, é possível ver que os teores de fósforo assimilável se encontram muito abaixo dos teores óptimos para a implementação de espécies vegetais, possivelmente devido à forte imobilização pelos óxidos de ferro existentes em grandes concentrações nos solos; os valores mais elevados de fósforo total poderão dever-se a anteriores aplicações de fertilizantes ou a contaminações locais por efluentes domésticos.

Foram ainda extraídos alguns nutrientes, associados à fracção mais solúvel e, portanto, mais biodisponível. Deste modo, determinaram-se as concentrações de alguns macronutrientes (cálcio, potássio e manganês) e micronutrientes (cobre, ferro, manganês, molibdénio e zinco). De uma forma geral, os macronutrientes apresentam teores muito baixos (inferiores aos tidos como referência para a fertilidade dos solos), enquanto que os micronutrientes apresentam teores muito elevados (superiores às referências) atingindo para alguns elementos níveis superiores aos limites excessivos para o uso agrícola dos solos. As mesmas conclusões apresenta o Índice de Nutrientes adaptado para este trabalho. São, no entanto, necessárias algumas precauções aquando da leitura dos resultados relativos ao Índice de Nutrientes que, por ser um índice qualitativo e não quantitativo, pode permitir simplificações que poderão não estar correctas. Os dados obtidos são congruentes com a disponibilidade de nutrientes referida na bibliografia para este tipo de solos, especialmente no que diz respeito aos macronutrientes. Os valores elevados nos micronutrientes devem-se à contaminação por acção da Votorantim Metais S.A. e não às características dos solos.

Não apenas os parâmetros e características químicas permitem a caracterização da adequabilidade de solos para a implementação de fitorremediação. Também os parâmetros físicos

do solo (nomeadamente a sua textura e porosidade) permitem caracterizar áreas em que o desenvolvimento radicular é favorecido. Os solos da área são essencialmente argilosos ou franco-argilosos e possuem uma porosidade relativamente baixa. Tendo em conta que um desenvolvimento radicular efectivo se processa preferencialmente em solos com porosidades elevadas e granulometria mista, correspondente a *loam* na classificação U.S.D.A. (e portanto, com boas capacidades de retenção de água, características de fracções mais finas, e uma boa aeração e drenagem, características de fracções mais grosseiras), os solos da área em estudo não se enquadraram nestes parâmetros. No entanto, embora os valores não sejam ideais, a sua textura com características argilosas e arenosas não impossibilita a sua utilização. Outro factor a ter em atenção encontra-se relacionado com o regime climático da área, associado aos elevados teores de argila, que podem levar à formação de crostas argilosas à superfície e à impermeabilização do solo. Por esta razão, terão de ser tidas em conta medidas de remeximento dos solos, de modo a impedir a formação desta crosta e a aumentar a porosidade, pelo menos até ao início do desenvolvimento radicular das espécies vegetais.

Em suma, em termos de fertilidade, a área em estudo não possui, de todo, características óptimas para um bom desenvolvimento de espécies vegetais. Destacam-se teores muito baixos de macronutrientes, essenciais para o desenvolvimento de qualquer espécie vegetal, assim como de carbono e azoto. Por estas razões, é necessária a utilização de correctores e fertilizantes, de modo a disponibilizar alguns nutrientes existentes nos solos e a aumentar a sua concentração na fracção biodisponível. Serão ainda necessárias correcções a nível das características físicas dos solos, nomeadamente relacionadas com a formação de crostas argilosas e com a baixa porosidade dos solos.

A remediação dos solos da área em estudo não será, como já foi referido, tarefa simples. Para além de teores muito altos em metais pesados e, fracções solúveis muito elevadas, não existem nestes solos teores de nutrientes suficientes para uma eficaz plantação e implementação de espécies vegetais. Tendo em conta todos estes constrangimentos, e sabendo que são necessárias correcções físico-químicas de modo a serem reunidas as condições para o desenvolvimento e crescimento das espécies vegetais, procedeu-se a uma recolha bibliográfica de espécies passíveis de sobreviver na área em estudo (tendo em conta não apenas as concentrações de elementos metálicos, mas também o clima, o pH do solo ou a disponibilidade de água) e de extrair do solo e acumular teores importantes destes elementos.

A lista completa encontra-se descrita nas Tabelas 6.1 e 6.2, nas quais se destacam as seguintes espécies como as mais indicadas para a utilização na área:

- *Pfaffia* sp., pela sua capacidade hiperacumuladora de cádmio e acumuladora de zinco, mas também por ser uma espécie nativa do Cerrado;
- *Gomphrena clausenii*, pela sua capacidade hiperacumuladora de zinco e acumuladora de cádmio, assim como, à semelhança da espécie anterior, ser endémica ao Cerrado;
- *Pityrogramma calomelanos*, uma espécie brasileira, com capacidade hiperacumuladora de arsénio;
- *Bracchiaria decumbens*, por ser uma espécie já utilizada em ensaios de fitorremediação na área para a acumulação de cobre;
- *Canavalia ensiformis*, é também uma espécie brasileira com capacidade hiperacumuladora de chumbo;
- *Cidrela fissilis* e *Handroanthus impetiginosus*, espécies endémicas do Cerrado, que possuem uma alta capacidade fitoestabilizadora e ainda alguma capacidade de acumulação de cobre e cádmio, respectivamente.

A distribuição e utilização destas espécies dependerá dos principais contaminantes no local e, por isso, irá variar em cada área. Para além dos contaminantes, terá ainda de ser tido em conta a capacidade do solo de suportar estas espécies, portanto, na área A3, em que se identificam solos litólicos, menos desenvolvidos e espessos, terão de ser implementadas espécies de menor dimensão.

Sugerem-se ainda, para além da utilização destas espécies, uma estabilização das áreas, especialmente nas áreas A3 e A5, mas também na área A4 com técnicas de Engenharia Ambiental. Estas permitem o mais fácil estabelecimento das espécies vegetais utilizadas na fitorremediação e diminuem a capacidade de erosão superficial associada às grandes escorrências e enxurradas típicas da época das chuvas. No entanto, há a ter ainda em conta que as técnicas de Engenharia Ambiental utilizadas não poderão interferir com o sucesso da fitorremediação nem impedir a poda das suas partes aéreas, de forma a serem eliminados os elementos metálicos aqui acumulados.





## **8. Referências Bibliográficas**



## Referências Bibliográficas

Adamo, P., Zampella, M., Gianfreda, L., Renella, G., Rutigliano, F. A., Terribile, F. (2006) – *Impact of river overflowing on trace element contamination of volcanic soils in south Italy: Part I. Trace element speciation in relation to soil properties*. Environmental Pollution, 144, 1, pp.308-316.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/> (consultado a 13.12.2013).

Almeida, R. F. (2012) – *Plantas acumuladoras de metais pesados no solo - uma revisão*. Revista de Biotecnologia & Ciência, v.2, 1, pp.28-46.

Amaral, D. C. (2013) - *Estudos ultraestruturais e da capacidade bioacumuladora de Zn, Cd e Pb por plantas em área de mineração de zinco*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre, Universidade Federal de Lavras, Lavras (Minas Gerais, Brasil).

Andreazza, R., Bortolon, L., Pieniz, S., Camargo, F. A. O., Bortolon E. S. O. (2013) – *Copper Phytoextraction and Phytostabilization by Brachiaria decumbens Stapf. in Vineyard Soils and a Copper Mining Waste*. Open Journal of Soil Science, v.3, pp.273-282.

Batista, A. A. M., Ribeiro, M. Q. C., Macedo, A. T. M., Tonidandel, D. (2008) – *Parecer Técnico GEDIN Nº 00107/2008: Barragem Murici*. FEAM.

Em: [http://www.semad.mg.gov.br/images/stories/urcparaopeba/3reuniao/4-2\\_votorantim\\_pt.pdf](http://www.semad.mg.gov.br/images/stories/urcparaopeba/3reuniao/4-2_votorantim_pt.pdf) (consultado a 02.12.2013).

Bird, G., Brewer, P. A., Macklin, M. G., Serban, M., Balteanu, D., Driga, B. (2005) – *Heavy metal contamination in the Aries river catchment, western Romania: Implications for development of the Rosia Montana gold deposit*. Journal of Geochemical Exploration, n.86, pp.26-48

Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (2003) – *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas & SIG*. Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia.

Em: <http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=790&sid=9> (consultado a 07.12.2013)

Bolle, J. N., Martin, H., Sondag, F., Cardoso Fonseca, E. (1988) – *Selective chemical extraction of uranium from mineral, soil and stream sediment samples at Horta da Vilariça, Northeastern Portugal*. Uranium, 4, 4, pp.327-340.

Borin, A. L. D. C. (2010) – *Fitorremediação de cádmio e zinco por Amaranthaceae*. Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, Lavras (Minas Gerais, Brasil), 169p.

Brown, J. (2011) – *Geochemically Determining Urban Garden Suitability: Surveying Oakland Soils*. Em [http://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2011final/BrownJ\\_2011.pdf](http://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2011final/BrownJ_2011.pdf) (consultado a 20.08.2014).

Caires, S. M., Fontes, M. P. F., Fernandes, R. B. A., Neves, J. C. L., Fontes, R. L. F. (2011) – *Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo*. Revista Árvore, v.35, 6, pp.1181-1188.

Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. (1994) – *A Glaciação Neopaleozóica na Porção Meridional da Bacia Sanfranciscana*. Revista Brasileira de Geociências, v.24, 2, pp.65-72.

Cappuyns, V., Swennen, R., Niclaes, M. (2007) – *Application of the BCR sequential extraction scheme to dredged pond sediments contaminated by Pb–Zn mining: A combined geochemical and mineralogical approach*. Journal of Geochemical Exploration, 93, pp.78–90.

Carneiro, M. A. C., Siqueira, J. O., Moreira, F. M. S. (2002) – *Comportamento de espécies herbáceas em misturas de solo com diferentes graus de contaminação com metais pesados*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1629-1638.

Carvalho, D. A. C., Filho, A. T. O., Vilela, E. A., Curi, N., van den Berg, E. , Fontes, M. A. L., Botezelli, L. (2005) – *Distribuição de espécies arbóreo-arbustivas ao longo de um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil*. Revista Brasileira Botânica, v.28, 2, pp.329-345.

Carvalho, M. T. V., Amaral, D. C., Guilherme, L. R. G., Aarts, M. G. M. (2013) – *Gomphrena clausenii, the first South American metallophyte species with indicator-like Zn and Cd accumulation and extreme metal tolerance*. Frontiers in Plant Science, v.4, 180, pp.1-10.

Chaves, L. H. G., Mesquita, E. F., Araújo, D. L., França, C. P. (2010) – *Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta*. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, 3, p. 263-277.

Cheng-xiu, L., Jie-min, C. (2011) – *Speciation of heavy metals in the sediments from different eutrophic lakes of China*. Procedia Engineering, 18, pp.318-323.

CONAMA (2012) – *Resoluções do CONAMA: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 1125p.

Conflitos Ambientais Minas Gerais. *Luta contra a poluição provocada por barragens de rejeitos operadas pela Votorantim Metais*. Em: <http://conflitosambientaismg.lcc.ufmg.br/conflito/?id=194> (consultado a 10.12.2013)

Conflitos Ambientais Minas Gerais. *Luta contra a poluição e mortandade de peixes no rio São Francisco em Três Marias*. Em: <http://conflitosambientaismg.lcc.ufmg.br/conflito/?id=197> (consultado a 10.12.2013)

COPAM (2011) – *Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011*. Conselho Estadual de Política Ambiental, 5p.

Costa, M. C. R., Damilano, C. R., Vasconcellos, A., Costa, R. C. (2008) – *Diagnóstico ambiental de área industrial contaminada por metais pesados*. Revista Biociências, v. 14, n. 1, p. 51-61.

Costa, R. D., Knauer, J. G., Prezotti, F. P. S., Paula, F. L., Duarte, F. T., Teixeira, L. F. (2011) – *Mapa Geológico Escala 1:100000 Folha Três Marias SE.23-Y-B-III*. CODEMIG, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Ministério de Minas e Energia.

Dafonte, J. D., Guitián, M. U., Paz-Ferreiro, J., Siqueira, G. M., Vázquez, E. V. (2010) – *Mapping of soil micronutrients in an european atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach*. *Bragantia*, n.69, pp.175-186.

Department of Agriculture & Cooperation, Government of India – *Soil Testing in India*. Em: <http://agricoop.nic.in/dacdivision/mmsoil280311.pdf> (consultado a 30.07.2014).

Dutton, G. (1996) – *Stemming the toxic tide*. *Compressed Air*, 101, pp.38-42.

de Abreu, C. B., Martins, A. H. (2009) – *Recuperação de sulfato de cálcio a partir do resíduo gerado no processamento de zinco primário*. *Estudos Tecnológicos*, v.5, 3, pp.332-340.

de Abreu, C. A., Coscione, A. R., Pires, A. M., Paz-Ferreiro, J. (2012) – *Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments*. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, pp.3–7.

dos Santos, J. F. (2010) - *Relatório Técnico 25: Perfil do Minério de Zinco*. Ministério de Minas e Geologia. Em: [http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_mineracao\\_brasileira/P16\\_RT25\\_Perfil\\_do\\_Minxrio\\_de\\_Zinco.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P16_RT25_Perfil_do_Minxrio_de_Zinco.pdf) (consultado a 03.09.2014).

Federal Remediation Technologies Roundtable.

Em: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-4.html> (consultado a 16.10.2014).

Fernandes, J. P. A., Freitas, A. R. M. (2011) – *Introdução à Engenharia Natural. Volume II*. EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A. ISBN 978-989-97459-5-7  
Em: [https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/3756/1/Livro\\_Engenharia\\_Natural\\_A5.pdf](https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/3756/1/Livro_Engenharia_Natural_A5.pdf) (consultado a 12.09.2014)

Fia, R., Frizzarim, S. S., Fia, F. L. R. (2013) – *Análise Qualitativa de Poluentes na Água das Chuvas em Lavras - MG*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol.18, n.2, pp.269-278.

França, A. C. M. (2011) – *Levantamento florístico e características anatômicas de espécies nativas do Cerrado em solos contaminados por metais pesados*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, Lavras (Minas Gerais, Brasil), 112p.

Francesconi, K., Visootiset, P., Sridokchan, W., Goessler, W. (2002) – *Arsenic species in an arsenic hyperaccumulating fern, Pityrogramma calomelanos: a potential phytoremediator of arsenic-contaminated soils*. The Science of Total Environment, Oxford, v.284, 1/3, p.27-35.

Gabos, M. B., Abreu, C. A., Coscione, A. R. (2009) – *EDTA assisted phytoremediation of a Pb contaminated soil: Metal leaching and uptake by jack beans*. Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.), v.66, 4, pp.506-514.

Golder Associates (2007a) – *Diagnóstico Geoquímico da Área Industrial da Votorantim Metais - Unidade Três Marias*. Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda.

Golder Associates (2007b) – *Projeto de Recuperação Ambiental dos Córregos Consciência e Barreiro Grande na Área Industrial da Votorantim Metais - Unidade Três Marias*. Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda.

Gomes, M. P., Marques, T. C. L., Carneiro, M. M. L., Soares, Â. M. (2012) – *Anatomical characteristics and nutrient uptake and distribution associated with the Cd-phytoremediation capacity of Eucalyptus camaldulenses Dehnh*. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, v.12, 3, pp.481-495.

Gonzaga, M. I. S., Santos, J. A. G., Ma, L. Q. (2006) – *Arsenic phytoextraction and hyperaccumulation by fern species*. Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.), v.63, 1, pp.90-101.

Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Owen, J. S., Hart, J. M. (2011) – *Soil test interpretation guide*. Oregon State University Extension Service Publications and Multimedia Catalog. Em: <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/22023> (consultado a 28.07.2014).

Kepner, W. G., Rubio, J. L., Mouat, D. A., Pedrazzini, F. (2003) – *Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue*. Springer, Series C: Environmental Security, vol.3, 614p.

Kabata-Pendias, A. (2001) – *Trace elements in soils and plants*. CRC press, 3ªed..

- Lana, V. M. (2011) – *Unidades de conservação e áreas de preservação permanente: estudo de caso para a bacia do rio São Francisco*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (Minas Gerais, Brasil), 106p.
- Lasat, M. M. (2000) – *Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues*. Journal of Hazardous Substance Research, v.2, 5, pp.1-25.
- Lee, P. K., Touray, J. C., Baillif, P., Ildefonse J. P. (1997) – *Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France*. Science of The Total Environment. n.201, pp.1–15.
- Li, X., Elliott, D. W., Zhang, W. (2006) – *Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 31, pp.111–122.
- Li, F., Fan, Z., Xiao, P., Oh, K., Ma, X., Hou, W. (2009) – *Contamination, chemical speciation and vertical distribution of heavy metals in soils of an old and large industrial zone in Northeast China*. Environmental geology, 57, 8, pp.1815-1823.
- Li, Y. M., Chaney, R., Brewer, E., Roseberg, R., Angle, J. S., Baker, A., Reeves, R., Nelkin, J. (2003) – *Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations*. Plant and Soil, 249, 1, p.107-115.
- Loch, D.S. (2006) – *Soil Nutrient Testing: How to Get Meaningful Results*. Healthy Soils for Great Turf, Department of Primary Industries and Fisheries, pp.13-22.
- Marinho, A. O. T., Abreu, A. V., Pol, A., da Costa, A. L., Costa, D. A. A., Ramos, D. B. S. A., do Nascimento, F. S., Eccard, G. H. A., Meyer, G., Christofidis, H. V., Rezende, J. A., André, M. A. S., Neves, M- J. M., Neto, P. B. S., Coimbra, R. M., Mattioli, R. L., Souza, R. S., Vendruscolo, S., Vieira, V. M., Alves, V. P. (2006) – *Caderno da região hidrográfica do São Francisco*. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 148p.

Marques, A. P. G. C., Rangel, A. O. S. S., Castro, P. M. L. (2009) – *Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up Technology*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v.39, pp.622–654.

Marques, T. C. L., Moreira, F. M. S., Siqueira, J. O. (2000) – *Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35, 1, pp.121-132.

Marx, E. S., Hart, J., Stevens, R. G. (1999) – *Soil Test Interpretation Guide*. Oregon State University. Em: [http://whatcom.wsu.edu/ag/documents/soil\\_compost/soiltestinterpretationguide.pdf](http://whatcom.wsu.edu/ag/documents/soil_compost/soiltestinterpretationguide.pdf) (consultado a 15.10.2014).

Melo, R. F., Dias, L. E., de Mello, J. V., de Oliveira, J. A. (2009) – *Potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solo contaminado por arsênio*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, 2, pp.455-465.

Melo, R. F., Dias, L. E., de Mello, J. V., de Oliveira, J. A. (2010) – *Behaviour of Eucalyptus grandis and E. cloeziana seedlings grown in arsenic-contaminated soil*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, pp.985-992.

Mozeto, A. A., Nascimento, M. D., Silva, E. F. A., Fioravanti, M. I. A. (2007) – *Avaliação da contaminação por metais e metalóides (água, sedimento e peixe) no Rio São Francisco em Três Marias (MG-Brasil): projeto de pesquisa participativa com a comunidade local*. Relatório Final Técnico-Científico. Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos. Em: [http://worldfish.org/PPA/PDFs/Semi-Annual%20VII/E-6b%20UFSCar%20Metals%20Project%20Technical%20 Report -%20port.pdf](http://worldfish.org/PPA/PDFs/Semi-Annual%20VII/E-6b%20UFSCar%20Metals%20Project%20Technical%20Report-%20port.pdf) (a 30.11.2013)

Müeller, N. C. Nowack, B. (2010) – *Nano zero valent iron – The solution for water and soil remediation?*. Report of the ObservatoryNANO, 32p.

Murphy, J., Riley, J. P. (1962) – *A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters*. Analytica Chimica Acta, n.27, pp.31-36.

Nude, P. M., Foli, G., Yidana, S. M. (2011) – *Geochemical Assessment of Impact of Mine Spoils on the Quality of Stream Sediments within the Obuasi Mines Environment, Ghana*. International Journal of Geosciences, n.2, pp.259-266.

Oliveira, D. L., Rocha, C., Moreira, P. C., Laudares, S. O. (2009) – *Plantas nativas do Cerrado: uma alternativa para fitorremediação*. Estudos, v. 36, n. 11/12, p. 1141-1159.

Oliveira, M. A., Horn, A. H. (2006) – *Comparação da Concentração de Metais Pesados nas Águas do rio São Francisco em Três Marias, desde 1991 até hoje, relacionando a atuação da CMM-Três Marias*. Geonomos, v.14, 1,2, pp.55-63.

Oliveira, M. R. (2007) – *Investigação da Contaminação por Metais Pesados da Água e do Sedimento de Corrente nas margens do Rio São Francisco e tributários, a jusante da Represa da Cemig, no município de Três Marias, Minas Gerais*. Tese Final de Doutorado em Geologia Económica e Aplicada. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil), 150p.

OMAFRA (2006) – *Soil Fertility Handbook p.611*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 198pp.

Paiva, H. N., Carvalho, J. G., Siqueira, J. O., Miranda, J. R. P., Fernandes, A. R. (2004) – *Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (Tabebuia impetiginosa) em solução nutritiva contaminada por cádmio*. Revista Árvore, v.28, 2, pp.189-197.

Pettijohn, E. J. (1975) – *Sedimentary Rocks*. Harper & Row Publishers, Harper International Edition, 3ª ed., 628 p.

Pilon-Smits, E. (2005) – *Phytoremediation*. Annual Review of Plant Biology, 56, pp.15-39.

Pinho, A. C. (2013) – *Avaliação Geoquímica de Ambientes Contaminados pela Extração Mineira, em Duas Distintas Regiões Geológicas e Climáticas*. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica, Universidade de Évora, Évora.

Pivetz, B. E. (2001) – *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Superfund Technology Support Center for Ground Water, 36p.

Prochnow, L. I. (2008) – *Otimização do uso de nutrientes em solos de baixa fertilidade da região tropical*. Informações agronômicas, n. 123, p.5-7.

Pueyo, M., Lopez-Sanchez, J. F., Rauret, G. (2004) – *Assessment of CaCl<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils*. Analytica chimica acta, 504, 2, pp.217-226.

Rauret, G. (1998) – *Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment*. Talanta, 46, 3, pp.449-455.

Rauret, G., López-Sánchez, J. F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ureb, A., Quevauvillerc, P. (1999) – *Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials*. Journal of Environmental Monitoring, n.1, pp.57–61.

Ravikumar, P., Somashekar, R. K. (2013) – *Evaluation of nutrient index using organic carbon, available P and available K concentrations as a measure of soil fertility in Varahi River basin, India*. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, n.3, 4, pp.330-343.

Romeiro, S. (2000) – *Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de canavalia ensiformes L*. Bragantia, Campinas, v.66, n.2, p. 327-334.

Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., Tandon, H. L. S. (2006) – *Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, n.16.

Sahuquillo, A., Rigol, A., Rauret, G. (2003) – *Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 22, 3, pp-152-159.

Salomons, W., Förstner, U. (1980) – *Trace metal analysis on polluted sediments. Part II: Evaluation of environmental impact*. Environmental Technology Letters, v.I, pp.506-517.

Salomons, W. (1995) – *Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention*. Journal of Geochemical Exploration, 52, 1, pp.5-23.

Santos, C. F., Novak, E. (2013) – *Plantas nativas do Cerrado e possibilidades em fitorremediação*. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v.7, 1, pp.67-77.

Santos, R. C. (2008) – *Planta do cerrado absorve metal nocivo ao meio ambiente*. Jornal da Unicamp, Campinas, n.409, p.8.

Em: [http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/setembro2008/ju409\\_pag8b.php](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/setembro2008/ju409_pag8b.php)

(consultado a 10.09.2014).

Sárdi, K., Balázs, Á., Salamon, B. (2012) – *Interrelations in Phosphorus and Potassium Accumulation Characteristics of Plants Grown in Different Soil Types*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.43, 1-2, pp.324-333.

Setzer, J. (1941) – *Avaliação da fertilidade do solo*. Bragantia, vol.1, n.5, pp.362-432.

Signorelli, N., Tuller, M. P., Silva, P. C., Justo, L. J. (2003) – *Carta Geológica Escala 1:250000 Folha SE.23-Y-B-Três Marias*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Ministério de Minas e Energia.

Silva, D. F., Galvíncio, J. D., Silva, D. F., Almeida, H. C. (2009) – *Análise espaço-temporal de parâmetros de qualidade de água no Alto São Francisco e sua relação com intervenções antrópicas*. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v.6, 2, pp.492-518.

Silva, R. F. (2007) – *Tolerância de espécies florestais arbóreas e fungos ectomicorrízicos ao cobre*. Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brasil), 134p.

Soares, C. R. F. S., Accioly, A. M. A., Marques, T. C. L. L. S. M., Siqueira, J. O., Moreira, F. M. S. (2001) – *Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco*. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, 13, 3, pp.302-3015.

Soares, C.R.F.S., Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., Curi, N., Accioly, A.M.A. Diagnóstico e reabilitação de solo contaminado por metais pesados: um estudo de caso.

Em:<http://www.fitorem.unah.edu.cu/Curso%20Recuperaci%C3%B3n%20de%20%C3%A1reas%20agr%C3%ADcolas%20con%20MP.%20M%C3%A9todos%20de%20estudio/materiales/Articulos%20par%20Seminarios/estudio%20de%20caso%20arboreas.pdf> (consultado a 20/12/2013)

Sun, R., Zhou, Q., Sun, F., Jin, C. (2007) – *Antioxidative defense and proline/phytochelatin accumulation in a newly discovered Cd- hyperaccumulator, Solanum nigrum L.* Environmental and Experimental Botany, 60, p.468-476.

Tessier, A., Campbell, P. G. C., Bisson, M. (1979) – *Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals.* Analytical Chemistry, 51, n.7, pp.844-851

Trindade, W. M. (2010) – *Concentração e distribuição de metais pesados em sedimentos do rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora/MG: Fatores naturais e antrópicos.* Dissertação de Mestrado em Geologia, na área de Geologia Econômica e Aplicada, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil), 111p.

Trindade, W. M., Horn, A. H., Ribeiro, E. V. (2012) – *Concentrações de metais pesados em sedimentos do rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora - MG: Geoquímica e Classificação de Risco Ambiental.* Geonomos, 20, 1, pp.64-75.

Universidade Federal de Viçosa. *Cerrado.*

Em: [ftp://www.ufv.br/def/disciplinas/ENF448/aula\\_10\\_fitogeografia/BIOMAS/CERRADO.pdf](ftp://www.ufv.br/def/disciplinas/ENF448/aula_10_fitogeografia/BIOMAS/CERRADO.pdf)

(consultado a 10.08.2014)

U.S.EPA (1997) – *Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb.* United States Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, 20p.

U.S.EPA (2007) – *Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils.* Em: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf> (consultado a 15/11/2013).

U.S.EPA (2008) – *Nanotechnology for Site Remediation Fact Sheet.* United States Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response, 17p.

Votorantim Metais. Em: <http://www.vmetais.com.br/pt-BR/Paginas/default.aspx> (consultado a 10.12.2013).

Wardlab. *Ward Guide*. Em: <http://www.wardlab.com/WardInfo/WardGuide.pdf> (consultado a 20.08.2014).

Wei, S., Zhou, Q., Wang, X., Zhang, K., Guo, G., Ma, L. Q. (2005) – *A newly discovered Cd-hyperaccumulator Solanum nigrum l.* Chinese Science Bulletin, Beijing, v.50, 1, p. 33-38.

Wuana, R. A., Okieimen, F. E. (2011) – *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation*. International Scholarly Research Network, v.2011, 20p.

Yao, Z., Li, J., Xie, H., Yu, C. (2012) – *Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals*. Procedia Environmental Sciences, 16, pp.722-729.

Zeitouni, C. F. (2003) – *Eficiência de espécies vegetais como fitoextractoras de cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco de um latossolo vermelho amarelo distrófico*. Dissertação apresentada ao Instituto Agronômico, Campinas, (São Paulo, Brasil), 103p.

Zeitouni, C. F., Berton, R. S., de Abreu, C. A. (2007) – *Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados*. Bragantia, Campinas, v.66, 4, pp.649-657.

Zhang, W. (2003) – *Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview*. Journal of Nanoparticle Research, 5, pp.323–332.



**Anexos**



## Anexo I: Tabelas

	Pág.
<b>Tabela A.1:</b> Listagem das amostras de solo, caracterização, localização e data de recolha.	175
<b>Tabela A.2:</b> Valores de pH e Eh determinados em todas as amostras de solos.	179
<b>Tabela A.3:</b> Valores da extracção parcial para todas as amostras de solos e valores de referência locais (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	181
<b>Tabela A.4:</b> Fracções extraídas em cádmio nas diferentes fases da extracção sequencial.	185
<b>Tabela A.5:</b> Fracções extraídas em cobalto nas diferentes fases da extracção sequencial.	187
<b>Tabela A.6:</b> Fracções extraídas em crómio nas diferentes fases da extracção sequencial.	187
<b>Tabela A.7:</b> Fracções extraídas em cobre nas diferentes fases da extracção sequencial.	188
<b>Tabela A.8:</b> Fracções extraídas em ferro nas diferentes fases da extracção sequencial.	189
<b>Tabela A.9:</b> Fracções extraídas em manganês nas diferentes fases da extracção sequencial.	190
<b>Tabela A.10:</b> Fracções extraídas em níquel nas diferentes fases da extracção sequencial.	191
<b>Tabela A.11:</b> Fracções extraídas em chumbo nas diferentes fases da extracção sequencial.	192
<b>Tabela A.12:</b> Fracções extraídas em zinco nas diferentes fases da extracção sequencial.	193
<b>Tabela A.13:</b> Percentagens de carbono (C), hidrogénio (H), azoto (N) e enxofre (S) determinadas por análise elementar.	195

<b>Tabela A.14:</b> Valores de fósforo total e assimilável nos solos da área em estudo.	197
<b>Tabela A.15:</b> Valores correspondentes à lixiviação dos solos após uma hora de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por <i>aqua regia</i> ) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	199
<b>Tabela A.16:</b> Valores correspondentes à lixiviação dos solos após três horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por <i>aqua regia</i> ) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	201
<b>Tabela A.17:</b> Valores correspondentes à lixiviação dos solos após dezoito horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por <i>aqua regia</i> ) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	203
<b>Tabela A.18:</b> Valores correspondentes à lixiviação dos solos após vinte e quatro horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por <i>aqua regia</i> ) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	205
<b>Tabela A.19:</b> Valores correspondentes à lixiviação dos solos após quarenta e oito horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por <i>aqua regia</i> ) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).	207
<b>Tabela A.20:</b> Valores obtidos nos solos da área em estudo para alguns dos principais macro e micronutrientes e comparação com os valores de referência para o uso agrícola.	209
<b>Tabela A.21:</b> Valores obtidos na análise textural dos solos da área em estudo e respectiva classificação segundo o diagrama triangular de Atterberg.	213
<b>Tabela A.22:</b> Valores de densidade aparente, densidade das partículas e porosidade das amostras de solo da área em estudo.	215
<b>Tabela A.23:</b> Factor de Enriquecimento (FE) calculado para todas as amostras de solos da área em estudo.	217
<b>Tabela A.24:</b> Índice de Geoacumulação calculado para todas as amostras de solos da área em estudo.	221

## Anexo 2: Mapas

	Pág.
<b>Figura A.1:</b> Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 0 e os 20 cm.	227
<b>Figura A.2:</b> Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 20 e os 40 cm.	229
<b>Figura A.3:</b> Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 40 e os 60 cm.	231



## **Anexo I: Tabelas**



Tabela A.1: Listagem das amostras de solo, caracterização, localização e data de recolha.

Amostra	Profundidade (cm)	Data de Amostragem	Coordenadas		Tipo de Amostra	Observações
			Latitude	Longitude		
CA0-1B	0-20 20-27	31-08-2013	S 18° 11,135'	W 45° 13,024'	<b>Solo:</b> Solo Litólico (RL)	Solo de pequena espessura, sobre siltitos e ardósias horizontais.
CA0-1C	0-20 20-40	31-08-2013	S 18° 11,123'	W 45° 13,008'	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo + Solo Litólico (LA + RL)	Solo pouco espesso (inferior a 40 cm) e pouco pedregoso em zona mais elevada.
CA0-2C	0-20 20-40 40-60	31-08-2013	S 18° 10,957'	W 45° 13,764'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Margem esquerda do córrego Consciência; Zona aplanada, levemente inclinada; Vegetação de Braquiárias.
CA0-3B	0-20 20-40 40-60	31-08-2013	S 18° 10,847'	W 45° 13,967'	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo (LA)	Solo em terraço localizado na margem direita.
CA0-3C	0-20 20-40 40-60	31-08-2013	S 18° 10,847'	W 45° 13,967'	<b>Solo:</b> Latossolo Amarelo + Solo Litólico (LA + RL)	Solo amostrado num barranco na margem direita.
CA1-19	0-20 20-30+	04-09-2013	S 18° 10,891'	W 45° 14,060'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo + Solo Litólico (LVA + RL)	Zona do cerrado com mato, na margem direita do córrego Consciência; Background da área.
CA1-33	0-20 20-40 40-60	12-11-2013	S 18° 10,867'	W 45° 14,277'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho (LV)	Solo na plataforma topo da superfície aluvionar (estações 23 e 32); Solo vermelho com zonas argilosas cinzentas (resultantes da deposição do rio durante as cheias).
CA3-15	0-20 20+	03-09-2013	S 18° 11,053'	W 45° 14,095'	<b>Solo:</b> Solo Litólico (RL)	Leito seco de um afluente do córrego Consciência (Grotta Seca); Rio intermitente; Zona muito pedregosa; Muitos afloramentos rochosos (Litologias quartzosas, intercalações de rochas vulcânicas).

CA3-17	0-20 20-40 40-50+	03-09-2013	S 18º 11,036'	W 45º 14,060'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo + Solo Litólico (LVA + RL)	Perfil com 50 cm; Solo da margem do córrego Grota Seca.
CA4-9	0-20 20-40 40-60	02-09-2013	S 18º 11,189'	W 45º 14,060'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) + Aterro	Zona de Aterro muito degradada; Solo com impregnações de fluidos metálicos com sulfatos hidratados de resíduos carreados de zona mais elevada.
CA4-40 Ocre	0-5	13-11-2013	S 18º 11,190'	W 45º 14,114'	<b>Fragmentos:</b> Minério de Fe oxidado	Amostragem de fragmentos de minério de Fe oxidado que cobrem a superfície do solo.
CA4-40	0-5	13-11-2013	S 18º 11,190'	W 45º 14,114'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Material argiloso de escorrência; Fragmentos de minério de Fe oxidado.
CA4-40	0-20 20-40 40-50+	13-11-2013	S 18º 11,190'	W 45º 14,114'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Solo com três camadas distintas: (0-5 cm) - Material argiloso de escorrência com fragmentos de minério de Fe oxidado; (5-40 cm) - solo de recomposição acinzentado (tentativa anterior de reflorestação); (40-50 cm) - Latossolo Amarelo (VA) sobre siltitos com estrutura botroidal (dijunção eferoidal).
CA4-41A	0-20	13-11-2013	S18º 11,301'	W 45º 14,036'	<b>Solo:</b> Aterro	Camada superficial em zona de aterro, sobre afloramentos de siltitos pré-câmbrios.
CA4-41B	0-20	13-11-2013	S18º 11,301'	W 45º 14,036'	<b>Fragmentos:</b> Enxofre	Fragmentos de Enxofre à superfície.
CA4-41C	0-20	13-11-2013	S18º 11,301'	W 45º 14,036'	<b>Solo:</b> Aterro	Camada superficial espessa de material solto alóctone, sobre siltitos desagregados.
CA4-54 [III]	0-20 20-40 40-60	13-03-2014	S18º 11,165'	W45º 14,35'	<b>Solo Laterítico</b>	Área muito pequena constituída maioritariamente por zona de aterro à volta de uma pequena ribeira; Mistura de solo com material de aterro; Solo Laterítico típico, vermelho amarelo, afloramento de siltitos, sem cobertura vegetal.
CA5-1	0-20 20-40 40-60	02-09-2013	S 18º 11,494'	W 45º 14,282'	<b>Solo:</b> Aterro	Zona de vossoroca (abarrancamento) com perfil de 110 cm; Zona de aterro típico; Concreto misturado com solo; Grande influência antrópica (Eucaliptos e Leucénia).
CA5-2	0-20	02-09-2013	S 18º 11,503'	W 45º 14,221'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo	Zona de cerrado; Camada de folhagem (sarapilheira)

	20-40 40-60				(LVA)	sobre o solo; Solo com alguma humidade.
CA5-3	0-20 20-40 40-60 60-65	02-09-2013	S 18º 11,465'	W 45º 14,156'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Solo sem horizonte A natural, coberto com camada de folhagem espessa; 2 camadas nítidas: 1 - material argiloso vermelho (alóctone) proveniente de recomposições anteriores e 2 - solo da região (Latossolo Vermelho Amarelo com nódulos branco-esverdeados); Vegetação degradada com espécies invasoras.
CA5-4	0-20 20-40 40-60	02-09-2013	S 18º 11,419'	W 45º 14,174'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Solo sem horizonte A (removido); Zona descampada com alinhamentos escassos de eucaliptos; Próxima da Unidade de Óxidação de Zn; Notória erosão e intensa actividade antrópica; Encontra-se abaixo da zona de cerrado verde.
CA5-5	0-20 20-40 40-60	02-09-2013	S 18º 11,634'	W 45º 14,332'	<b>Solo:</b> Gleissolo Háptico (GX)	Solo húmido, ambiente redutor; Perto do córrego Barreiro Grande; Amostragem em clareira com capim de pastagem; À volta, vegetação secundária (bananeira).
CA5-7	0-20 20-40 40-60	02-09-2013	S 18º 11,513'	W 45º 14,108'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Zona a montante do córrego Barreiro Grande; Área de cerrado ralo com braquiária.
CA5-42	0-10	13-11-2013	S18º 11,444'	W45º 14,158'	<b>Fragmentos:</b> Sulfatos Hidratados	Superfície de escorrência para córrego do Barreiro Grande; Rejeitos antigos de minério.
CA5-43	0-20 20-40 40-60	13-11-2013	S 18º 11,588'	W 45º 14,207'	<b>Solo:</b> Latossolo Vermelho Amarelo (LVA)	Amostragem em perfil aberto com 65 cm; Perfil do solo.



Tabela A.2: Valores de pH e Eh determinados em todas as amostras de solos.

Amostras	Profundidade (cm)	pH	Eh (mV)
CA0-1B	0-20	4,88	304
	20-27	4,81	304
CA0-1C	0-20	4,87	282
	20-40	5,49	319
CA0-2C	0-20	5,73	273
	20-40	4,70	215
	40-60	5,57	294
CA0-3B	0-20	4,88	150
	20-40	4,63	157
	40-60	4,75	198
CA0-3C	0-20	4,93	198
	20-40	4,68	213
	40-60	4,66	203
CA1-19	0-20	5,31	233
	20-30+	4,79	243
CA1-33	0-20	6,15	260
	20-40	6,37	248
	40-60	6,19	229
CA3-15	0-20	8,03	310
	20+	8,22	264
CA3-17	0-20	5,89	276
	20-40	4,66	283
	40-50+	4,76	281
CA4-9	0-20	4,30	192
	20-40	4,36	238
	40-60	4,35	286
CA4-40 Ocre	0-5	5,64	-
CA4-40	0-5	6,50	-
CA4-40	0-20	6,72	251
	20-40	5,81	229
	40-50+	5,52	234
CA4-41A	0-20	3,42	402
CA4-41B	0-20	3,54	-
CA4-41C	0-20	4,44	268
CA4-54 [III]	0-20	5,74	269
	20-40	5,76	250

	40-60	5,90	221
CA5-1	0-20	7,55	218
	20-40	7,63	202
	40-60	7,48	214
CA5-2	0-20	6,90	223
	20-40	6,21	238
	40-60	5,42	245
CA5-3	0-20	4,90	260
	20-40	5,46	286
	40-60	6,56	288
	60-65	6,48	282
CA5-4	0-20	6,54	356
	20-40	7,22	298
	40-60	7,16	315
CA5-5	0-20	5,40	292
	20-40	5,34	305
	40-60	5,61	293
CA5-7	0-20	5,84	141
	20-40	4,67	173
	40-60	4,68	211
CA5-42	0-10	6,83	-
CA5-43	0-20	4,82	260
	20-40	4,96	267
	40-60	5,06	280



Tabela A.3: Valores da extracção parcial para todas as amostras de solos e valores de referência locais (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).  
VRQ – Valor de Referência de Qualidade; VP – Valor de Prevenção; VI Industrial - Valor de Investigação Industrial.

Amostras	Profundidade (cm)	Digestão Parcial										
		As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (%)	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1B	0-20	< 0,25	0,4471	2,0488	21,8448	83,6336	31421,1473	3,1421	59,9281	8,3718	5,1781	49,8916
	20-27	< 0,25	0,1668	2,0971	57,2539	80,0938	39714,3998	3,9714	58,5415	8,6131	5,1899	43,8690
CA0-1C	0-20	< 0,25	0,0512	1,7007	19,8058	57,7319	29931,9728	2,9932	53,4303	8,0020	3,7071	33,3214
	20-40	< 0,25	< 0,025	1,1990	18,8778	28,6053	29206,6347	2,9207	371,3214	7,0131	5,0715	38,6411
CA0-2C	0-20	< 0,25	0,1353	0,9998	19,9235	14,4306	23845,2310	2,3845	380,6432	6,1243	5,5790	84,5652
	20-40	< 0,25	< 0,025	1,7385	21,3700	24,0979	29793,3638	2,9793	35,1630	8,6613	3,8317	25,5599
	40-60	< 0,25	< 0,025	0,9932	22,0312	17,3260	30870,0834	3,0870	292,6258	7,4203	5,2967	21,3966
CA0-3B	0-20	< 0,25	0,4651	2,9336	23,9476	19,5517	32010,7399	3,2011	83,7073	8,1183	6,5443	207,6165
	20-40	< 0,25	< 0,025	3,0451	25,6911	19,2988	34554,7125	3,4555	58,1292	8,4838	4,3809	49,2084
	40-60	< 0,25	< 0,025	2,9482	24,8153	19,1945	34539,2764	3,4539	41,1248	8,4692	3,8717	36,9455
CA0-3C	0-20	< 0,25	0,2166	2,4417	23,2385	18,9600	31901,5348	3,1902	58,9456	8,0314	5,6084	125,0850
	20-40	1,6567	< 0,025	2,5373	22,7530	18,3052	32079,6020	3,2080	58,5922	8,0036	4,5106	80,5957
	40-60	< 0,25	< 0,025	2,6321	22,8719	18,1991	32479,1418	3,2479	53,3745	8,3519	3,8884	59,4959
CA1-19	0-20	3,3062	1,8777	5,1704	32,7845	24,5300	40546,4699	4,0546	182,5516	10,4602	12,5970	633,5419
	20-30+	< 0,25	< 0,025	4,3852	45,7533	26,6863	54003,9841	5,4004	118,7071	10,1887	5,8477	153,4833
CA1-33	0-20	25,9161	10,6526	11,2204	35,0802	362,0474	131878,3758	13,1878	778,4785	19,0942	1894,9034	36419,2999
	20-40	42,5723	9,3135	15,0058	39,5536	515,8306	183232,8891	18,3233	1096,2848	20,4992	2763,1128	47947,2384
	40-60	36,2916	8,0384	12,2737	28,8669	399,2022	138128,4998	13,8128	992,7296	17,6064	1827,3658	38244,5919
CA3-15	0-20	1672,8010	157,0104	5,1510	21,6585	732,6792	39902,2151	3,9902	1107,3833	21,0786	165,3632	15306,3261
	20+	1731,0855	108,2161	7,1613	19,7421	1046,8157	36512,6975	3,6513	972,6410	20,1153	150,6740	12727,4545

CA3-17	0-20	3,2226	11,5366	2,5429	131,6640	57,0784	44503,1923	4,4503	312,5967	9,2582	48,2258	1905,8105
	20-40	5,1533	0,7315	2,9382	23,8348	19,1061	31088,0670	3,1088	103,9816	8,4751	6,2087	207,1382
	40-50+	1,2496	2,4365	4,2710	23,8111	23,7449	34155,0696	3,4155	164,9649	9,0815	16,0571	279,1425
CA4-9	0-20	< 0,25	7,3918	5,1142	24,0905	19,0336	47874,8759	4,7875	122,6210	9,0594	4,9686	804,9442
	20-40	2,4095	4,2487	17,8002	15,8391	15,8277	37026,3263	3,7026	236,7545	8,1211	7,3700	461,4676
	40-60	< 0,25	5,2318	27,3055	16,5559	15,9298	49419,8840	4,9420	404,7874	7,7318	14,3388	456,8022
CA4-40 Ocre	0-5	< 0,25	12,6760	0,2938	216,7235	263,2562	159553,6449	15,9554	44,9104	12,5925	27,6458	904,2934
CA4-40	0-5	< 0,25	24,3284	9,8757	41,8696	155,6474	45239,1710	4,5239	691,6965	12,9038	204,0336	6779,1118
CA4-40	0-20	< 0,25	28,6343	4,5120	44,2401	93,1199	36034,5760	3,6035	304,6106	13,0906	45,7634	2505,8656
	20-40	< 0,25	7,6809	4,3242	41,3419	102,1186	29989,0938	2,9989	275,3227	15,2456	39,5550	1296,8515
	40-50+	< 0,25	6,3568	4,8299	36,0168	93,2690	44099,9117	4,4100	464,9014	12,0830	66,0775	939,4485
CA4-41A	0-20	7,1466	< 0,025	< 0,05	25,0777	142,6030	99476,2850	9,9476	71,2947	4,5105	25,7421	721,3109
CA4-41B	0-20	3,1844	0,1961	0,2939	31,4183	19,3522	1195,9358	0,1196	13,5396	< 0,05	19,0361	23,5530
CA4-41C	0-20	< 0,25	< 0,025	143,0281	56,6242	4097,4902	56888,2093	5,6888	65,0276	16,8577	7,1510	595,7981
CA4-54 [III]	0-20	3,8270	5,9009	9,4480	26,7261	257,6278	44521,1238	4,4521	598,9137	17,5276	884,9777	10115,9232
	20-40	< 0,25	7,5299	9,5957	39,6736	199,0496	44661,8090	4,4662	401,7834	11,7757	430,2145	5550,7120
	40-60	< 0,25	11,5536	12,7944	62,2147	193,6345	51603,2191	5,1603	513,9135	17,8571	454,5194	5367,5627
CA5-1	0-20	15,1146	7,9022	5,2926	18,3390	46,7226	32494,5077	3,2495	455,5523	11,6040	283,3124	11603,7547
	20-40	7,9108	8,6214	5,5511	17,8832	69,0552	33197,8588	3,3198	666,5877	11,0744	333,2357	12034,0999
	40-60	7,3999	7,5248	4,4164	19,6566	56,8563	31490,6709	3,1491	323,3808	10,2223	100,5597	9527,5903
CA5-2	0-20	98,1590	41,4471	17,4025	16,6143	731,5931	30141,2092	3,0141	1083,0109	12,0011	684,3381	25039,7772
	20-40	< 0,25	14,8422	1,1463	22,1550	25,8962	33861,6427	3,3862	35,1265	8,1120	4,9464	768,6470
	40-60	< 0,25	1,6956	1,1998	23,8650	22,8263	37152,5695	3,7153	35,4633	8,5680	3,7320	160,5198
CA5-3	0-20	< 0,25	1,4786	1,2498	13,6950	15,2145	26254,7491	2,6255	36,3708	5,8544	3,4264	111,8919
	20-40	10,6279	19,9290	13,4757	21,7674	123,5392	31613,0964	3,1613	155,5330	8,3200	14,3971	955,3256
	40-60	92,6539	61,8012	16,7567	20,9176	863,1777	28671,4686	2,8671	297,1629	15,6215	81,3265	13595,4382

	60-65	336,0024	3503,7046	6,6248	22,0293	235,0764	32169,9366	3,2170	1914,5975	72,4244	606,9562	95036,3362
CA5-4	0-20	21,1727	62,5518	8,1943	21,1084	213,5218	31982,5189	3,1983	168,2855	12,7979	45,6837	3796,8647
	20-40	0,6005	17,5089	2,3495	14,6399	33,3254	27114,5771	2,7115	102,1151	6,8057	13,7768	626,1005
	40-60	< 0,25	24,1136	2,3791	16,3585	31,2835	28846,1538	2,8846	101,3745	6,3492	32,0399	620,1987
CA5-5	0-20	6,8333	6,5781	3,8438	29,3634	35,9526	35682,9073	3,5683	147,0221	9,2893	46,8679	1430,8775
	20-40	< 0,25	1,3402	4,9800	22,9514	23,9046	34148,6260	3,4149	81,9781	10,2111	11,1037	539,1277
	40-60	< 0,25	0,9211	4,1799	22,6616	21,1599	31528,6624	3,1529	94,1450	9,3593	9,6225	399,8914
CA5-7	0-20	< 0,25	7,0512	1,8947	17,2659	26,6860	39938,1731	3,9938	244,4811	6,7771	34,0219	778,1481
	20-40	< 0,25	0,2239	1,6912	18,6302	18,2221	41275,3681	4,1275	52,6158	6,8505	4,6764	90,1280
	40-60	< 0,25	0,1078	1,9000	20,6120	18,7902	43200,0000	4,3200	41,1638	7,3237	4,1255	82,7877
CA5-42	0-10	6270,0194	9944,9434	1125,0492	5,6742	54505,7898	2499,1649	0,2499	651,2554	573,0607	1892,9581	151921,3519
CA5-43	0-20	< 0,25	15,2713	3,4804	49,1233	269,1318	67615,6338	6,7616	63,5456	14,5748	12,5985	763,8063
	20-40	< 0,25	14,1425	7,5998	34,9828	130,7357	45083,1836	4,5083	178,8486	11,4325	3,9266	462,2960
	40-60	< 0,25	10,6465	3,2232	36,7398	127,5749	56199,4788	5,6199	153,9529	10,3053	3,8734	361,0386

<b>SOLOS</b> COPAM, 2011; CONANA, 2012	<b>As</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Cd</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Co</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Cr</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Cu</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Ni</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Pb</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )	<b>Zn</b> (mg.kg <sup>-1</sup> )
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 75	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	75	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	75-400	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 400	> 600	> 130	> 900	> 2000



Tabela A.4: Fracções extraídas em cádmio nas diferentes fases da extracção sequencial.

Cd								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	0,2454	0,0240	< 0,03	0,2040	< 0,025	0,4734	< 0,025
CA0-2C	0-20	1,7021	0,1007	< 0,03	0,2020	< 0,025	2,0048	0,1353
CA0-3C	0-20	0,3503	0,1189	< 0,03	0,1765	< 0,025	0,6457	0,2166
CA1-33	20-40	8,0459	1,8030	2,3563	0,7305	< 0,025	12,9357	9,3135
CA3-15	0-20	10,6203	30,5977	2,6857	< 0,01	< 0,025	43,9037	157,0104
	20+	96,5993	25,5353	6,0707	< 0,01	< 0,025	128,2053	108,2161
CA4-9	0-20	6,0550	1,0292	< 0,03	0,1608	< 0,025	7,2450	7,3918
	40-60	3,6142	0,7775	< 0,03	0,1814	< 0,025	4,5731	5,2318
CA4-40	0-5	19,3669	3,8930	0,8578	0,8403	3,9686	28,9266	24,3284
CA4-40	40-50+	5,4763	2,0010	0,3930	0,2498	< 0,025	8,1201	6,3568
CA5-2	0-20	37,8438	11,9445	4,6463	0,2675	11,4662	66,1683	41,4471
CA5-3	40-60	72,3204	8,9570	3,3591	1,3640	11,5889	97,5894	61,8012
CA5-4	0-20	61,2247	10,4031	< 0,03	0,2010	< 0,025	71,8288	62,5518
	40-60	22,7346	4,4844	< 0,03	< 0,01	< 0,025	27,2190	24,1136
CA5-43	0-20	9,1073	1,8449	0,3136	0,2493	< 0,025	11,5151	15,2713

Tabela A.5: Fracções extraídas em cobalto nas diferentes fases da extracção sequencial.

Co								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	< 0,02	1,4685	< 0,03	0,3536	3,0424	4,8645	1,1990
CA0-2C	0-20	0,1781	1,4561	< 0,03	0,3403	13,6701	15,6447	0,9998
CA0-3C	0-20	0,0936	0,5268	< 0,03	0,1866	< 0,025	0,8070	2,4417
CA1-33	20-40	0,3272	8,0138	< 0,03	2,7877	< 0,025	11,1287	15,0058
CA3-15	0-20	0,0203	24,5019	1,1050	0,2664	< 0,025	25,8935	5,1510
	20+	2,9374	28,2042	0,7821	0,2986	< 0,025	32,2223	7,1613
CA4-9	0-20	2,1235	3,7139	0,1090	0,2821	0,6437	6,8723	5,1142
	40-60	1,5804	5,2322	8,2784	0,1008	1,7844	16,9762	27,3055
CA4-40	0-5	1,3866	9,4885	1,6638	0,0258	< 0,025	12,5647	9,8757
CA4-40	40-50+	0,0360	5,9034	0,9188	< 0,01	< 0,025	6,8582	4,8299
CA5-2	0-20	6,3874	20,2388	0,7335	0,7375	< 0,025	28,0972	17,4025
CA5-3	40-60	13,4362	11,3731	1,8134	0,0810	< 0,025	26,7037	16,7567
CA5-4	0-20	1,7506	7,3223	0,1090	0,1532	0,6842	10,0194	8,1943
	40-60	0,7469	0,6803	8,2784	0,3035	0,7343	10,7435	2,3791
CA5-43	0-20	0,5273	0,7883	0,0555	< 0,01	< 0,025	1,3711	3,4804

Tabela A.6: Fracções extraídas em crómio nas diferentes fases da extracção sequencial.

Cr								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	< 0,02	< 0,02	0,7839	1,7549	13,3450	15,8838	18,8778
CA0-2C	0-20	1,1282	< 0,02	1,7946	1,9879	18,0250	22,9357	19,9235
CA0-3C	0-20	< 0,02	< 0,02	1,6940	1,4391	36,2852	39,4217	23,2385
CA1-33	20-40	0,9501	< 0,02	3,8184	1,8226	40,0589	46,6499	39,5536
CA3-15	0-20	< 0,02	< 0,02	2,2807	2,2279	11,2340	15,7425	21,6585
	20+	0,2366	< 0,02	3,9733	2,2070	13,4560	19,8729	19,7421
CA4-9	0-20	< 0,02	< 0,02	0,4307	1,9592	42,5354	44,9253	24,0905
	40-60	< 0,02	< 0,02	0,2950	2,0607	17,0334	19,3890	16,5559
CA4-40	0-5	< 0,02	< 0,02	3,2732	2,6810	56,8966	62,8508	41,8696
CA4-40	40-50+	0,0240	< 0,02	2,2190	3,0683	32,1825	37,4938	36,0168
CA5-2	0-20	0,0363	< 0,02	2,1275	2,2145	65,9063	70,2845	16,6143
CA5-3	40-60	0,0734	< 0,02	1,5295	1,6109	54,9370	58,1508	20,9176
CA5-4	0-20	< 0,02	< 0,02	0,4307	0,5055	< 0,025	0,9362	21,1084
	40-60	< 0,02	< 0,02	0,2950	2,0668	< 0,025	2,3618	16,3585
CA5-43	0-20	< 0,02	< 0,02	2,8220	7,3789	146,5184	156,7193	49,1233

Tabela A.7: Fracções extraídas em cobre nas diferentes fases da extracção sequencial.

Cu								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	0,7793	0,1067	2,8588	2,8600	34,3490	40,9537	28,6053
CA0-2C	0-20	2,7313	0,0943	2,9986	0,7301	27,1461	33,7004	14,4306
CA0-3C	0-20	0,9460	< 0,02	1,9028	7,7092	43,9485	54,5065	18,9600
CA1-33	20-40	82,1381	27,1042	31,1252	10,3977	138,4300	289,1952	515,8306
CA3-15	0-20	42,0631	285,3620	53,4492	2,7050	66,0458	449,6252	732,6792
	20+	1120,9463	351,7042	65,8661	2,4069	61,4398	1602,3633	1046,8157
CA4-9	0-20	0,2322	< 0,02	0,5298	1,9718	55,2045	57,9383	19,0336
	40-60	0,2319	< 0,02	0,0965	0,9678	48,0981	49,3944	15,9298
CA4-40	0-5	30,9697	27,5879	21,8382	2,8388	49,7447	132,9792	155,6474
CA4-40	40-50+	12,1352	14,0186	13,3782	2,0072	55,1724	96,7116	93,2690
CA5-2	0-20	528,6344	145,6105	134,4222	3,1822	89,3437	901,1930	731,5931
CA5-3	40-60	785,4110	203,7361	59,8460	4,9307	59,3174	1113,2412	863,1777
CA5-4	0-20	116,6313	66,8998	0,5298	2,2672	62,6549	248,9831	213,5218
	40-60	9,6126	7,4746	0,0965	2,7105	42,7616	62,6558	31,2835
CA5-43	0-20	6,3517	6,1317	8,8146	2,5274	64,2660	88,0914	269,1318

Tabela A.8: Fracções extraídas em ferro nas diferentes fases da extracção sequencial.

Fe								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	35,3187	314,6116	2782,5423	2014,2701	19098,5223	24245,2649	29206,6347
CA0-2C	0-20	108,5799	344,0662	2647,0168	885,1328	13390,7014	17375,4972	23845,2310
CA0-3C	0-20	80,4311	162,4619	1699,5235	563,5453	19501,1615	22007,1232	31901,5348
CA1-33	20-40	65,8705	377,5492	3872,8359	476,2917	91189,7621	95982,3095	183232,8891
CA3-15	0-20	110,7752	541,3685	1146,8793	70,7001	29119,2899	30989,0131	39902,2151
	20+	107,0675	550,6007	3428,4740	104,4136	26184,1060	30374,6617	36512,6975
CA4-9	0-20	7,5175	38,2103	1331,3903	724,9539	33730,3805	35832,4524	47874,8759
	40-60	3,2621	50,6581	920,9107	473,4958	26356,5529	27804,8797	49419,8840
CA4-40	0-5	51,1321	178,7907	1872,4191	267,9761	19804,1563	22174,4744	45239,1710
CA4-40	40-50+	103,4164	114,1363	1528,2469	389,0638	25901,2594	28036,1228	44099,9117
CA5-2	0-20	58,7520	270,2425	1183,7851	250,0744	24106,3138	25869,1678	30141,2092
CA5-3	40-60	34,8726	181,9148	1032,3833	156,0139	23388,5655	24793,7501	28671,4686
CA5-4	0-20	19,4632	175,8763	1331,3903	1603,9600	26945,2970	30075,9867	31982,5189
	40-60	29,4072	120,5944	920,9107	320,4939	23090,3014	24481,7078	28846,1538
CA5-43	0-20	47,9327	122,8067	2765,0535	937,5928	35172,1988	39045,5843	67615,6338

Tabela A.9: Fracções extraídas em manganês nas diferentes fases da extracção sequencial.

Mn								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extracção (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	74,8158	432,7441	51,0676	1,6750	27,4091	587,7116	371,3214
CA0-2C	0-20	139,5943	428,7684	74,6526	1,8036	23,1906	668,0095	380,6432
CA0-3C	0-20	15,0073	16,6377	4,7015	1,9696	67,8445	106,1607	58,9456
CA1-33	20-40	45,5804	991,4858	79,1299	38,3381	83,1715	1237,7057	1096,2848
CA3-15	0-20	111,3301	1123,9787	88,9772	0,7584	111,2168	1436,2613	1107,3833
	20+	61,8827	1035,1786	105,7707	1,2353	78,5041	1282,5714	972,6410
CA4-9	0-20	64,0358	34,0373	6,8569	1,5975	135,9544	242,4819	122,6210
	40-60	51,1719	408,7396	74,1162	0,4873	120,1255	654,6406	404,7874
CA4-40	0-5	92,8272	499,4155	72,7313	9,3394	80,2718	754,5852	691,6965
CA4-40	40-50+	27,0327	436,7827	52,3259	8,1677	79,9913	604,3003	464,9014
CA5-2	0-20	98,1924	1416,5078	100,0402	4,9907	140,6661	1760,3972	1083,0109
CA5-3	40-60	30,0587	426,1186	46,2817	10,0426	118,5439	631,0455	297,1629
CA5-4	0-20	29,7074	150,2382	6,8569	2,0284	41,6481	230,4790	168,2855
	40-60	38,9580	39,5118	74,1162	2,0823	31,7860	186,4544	101,3745
CA5-43	0-20	9,4576	8,5900	< 0,03	2,3198	209,8223	230,1896	63,5456

Tabela A.10: Frações extraídas em níquel nas diferentes fases da extração sequencial.

Ni								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extração (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	0,1066	0,8309	0,8873	0,1844	2,7200	4,7292	7,0131
CA0-2C	0-20	0,7323	0,9762	1,2178	0,2736	2,0106	5,2106	6,1243
CA0-3C	0-20	< 0,02	0,4046	1,9483	0,2263	2,4346	5,0139	8,0314
	20-40	0,8573	2,5186	0,5619	1,7822	6,5863	12,3063	20,4992
CA3-15	0-20	0,7239	7,9778	4,4019	0,1515	7,9717	21,2267	21,0786
	20+	7,9645	8,8179	5,3763	0,1908	6,8241	29,1736	20,1153
CA4-9	0-20	0,8149	0,6124	1,3434	0,1784	2,6285	5,5776	9,0594
	40-60	0,4722	0,9317	2,6344	0,1987	2,1646	6,4016	7,7318
CA4-40	0-5	1,1496	0,9482	1,8667	0,5215	4,2015	8,6876	12,9038
CA4-40	40-50+	< 0,02	0,1988	0,8015	0,4784	4,0611	5,5398	12,0830
CA5-2	0-20	5,5777	1,4110	< 0,03	0,5492	5,1076	12,6689	12,0011
	40-60	10,3563	1,5328	1,2095	0,4896	6,3834	19,9715	15,6215
CA5-4	0-20	3,0359	1,4889	1,3434	0,1901	3,3427	9,4011	12,7979
	40-60	0,1471	0,4771	2,6344	0,2827	0,9631	4,5043	6,3492
CA5-43	0-20	< 0,02	< 0,02	0,3659	0,4652	3,7083	4,5394	14,5748

Tabela A.11: Frações extraídas em chumbo nas diferentes fases da extração sequencial.

Pb								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extração (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	1,1326	3,3130	0,8800	0,5604	1,7292	7,6152	5,0715
CA0-2C	0-20	11,7961	3,4519	1,6723	0,5691	1,8450	19,3345	5,5790
CA0-3C	0-20	3,9302	1,9945	1,2455	< 0,01	17,3233	24,4934	5,6084
	20-40	655,4449	109,8661	142,8849	160,8395	572,3925	1641,4278	2763,1128
CA3-15	0-20	32,3183	89,7235	29,9553	< 0,01	61,6098	213,6069	165,3632
	20+	97,9990	72,4264	30,9656	0,1128	38,8494	240,3532	150,6740
CA4-9	0-20	1,8121	1,2161	< 0,03	0,6034	5,8675	9,4990	4,9686
	40-60	2,5036	8,7393	2,6655	0,5850	11,5508	26,0442	14,3388
CA4-40	0-5	70,0141	85,6954	29,8800	1,4823	51,7597	238,8315	204,0336
CA4-40	40-50+	21,0685	36,8299	13,6115	0,0788	10,2197	81,8084	66,0775
CA5-2	0-20	320,7886	226,1448	121,6408	7,6534	111,6560	787,8837	684,3381
	40-60	67,8432	65,5816	16,6491	5,3666	44,8705	200,3110	81,3265
CA5-4	0-20	41,0463	31,8583	< 0,03	0,5876	15,2311	88,7233	45,6837
	40-60	8,1048	6,5876	2,6655	0,3377	10,3614	28,0569	32,0399
CA5-43	0-20	2,7911	2,1445	2,2632	< 0,01	32,1379	39,3367	12,5985

Tabela A.12: Frações extraídas em zinco nas diferentes fases da extração sequencial.

Zn								
Amostras	Profundidade (cm)	#1 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#4 (mg.kg <sup>-1</sup> )	#5 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total Extração (mg.kg <sup>-1</sup> )	Digestão Parcial (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1C	20-40	10,5389	9,0835	< 0,03	1,6827	< 0,025	21,3051	38,6411
CA0-2C	0-20	87,0262	27,6967	< 0,03	3,3497	< 0,025	118,0726	84,5652
CA0-3C	0-20	64,3386	24,0798	0,2743	11,8927	14,2877	114,8732	125,0850
CA1-33	20-40	15695,5878	14958,6598	311,0770	2860,0119	750,6346	34575,9711	47947,2384
CA3-15	0-20	10568,0766	3073,5343	262,4070	42,3924	193,7588	14140,1691	15306,3261
	20+	6354,8546	3745,9709	232,3652	31,7274	150,8000	10515,7180	12727,4545
CA4-9	0-20	582,0376	88,6116	20,6156	7,7668	28,5975	727,6291	804,9442
	40-60	367,6984	70,4891	4,6087	3,9261	60,2278	506,9501	456,8022
CA4-40	0-5	3299,3087	1623,5445	232,8442	70,0755	212,3418	5438,1146	6779,1118
CA4-40	40-50+	318,5794	240,5105	121,4762	19,9132	107,4598	807,9391	939,4485
CA5-2	0-20	13897,7448	11762,1969	322,4296	95,4045	525,1585	26602,9345	25039,7772
CA5-3	40-60	11628,2698	1720,2744	225,3504	134,2787	189,5921	13897,7655	13595,4382
CA5-4	0-20	3157,4265	716,9907	20,6156	1,8361	221,6209	4118,4897	3796,8647
	40-60	284,5401	145,4749	4,6087	47,4350	38,3175	520,3762	620,1987
CA5-43	0-20	255,0922	194,9043	72,0854	7,7288	70,7000	600,5107	763,8063



Tabela A.13: Percentagens de carbono (C), hidrogénio (H), azoto (N) e enxofre (S) determinadas por análise elementar.

Amostras	Profundidade (cm)	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]
CA0-1B	0-20	1,550	0,727	0,140	0,008
	20-27	1,360	0,698	0,130	0,010
CA0-1C	0-20	1,250	0,666	0,100	0,005
	20-40	1,080	0,600	0,100	0,013
CA0-2C	0-20	1,610	0,605	0,110	0,019
	20-40	0,980	0,677	0,080	0,009
	40-60	0,720	0,618	0,060	0,023
CA0-3B	0-20	1,280	0,671	0,110	0,025
	20-40	0,930	0,697	0,060	0,011
	40-60	0,800	0,682	0,070	0,009
CA0-3C	0-20	1,210	0,687	0,100	0,017
	20-40	1,090	0,665	0,080	0,019
	40-60	0,930	0,660	0,060	0,026
CA1-19	0-20	2,190	0,855	0,150	0,010
	20-30+	1,130	0,829	0,090	0,007
CA1-33	0-20	1,050	0,817	0,110	0,037
	20-40	0,810	0,713	0,050	0,137
	40-60	0,880	0,681	0,060	0,228
CA3-15	0-20	0,670	0,469	0,040	0,022
	20+	0,710	0,522	0,040	0,024
CA3-17	0-20	1,530	0,593	0,100	0,032
	20-40	0,790	0,537	0,060	0,011
	40-50+	0,800	0,588	0,060	0,039
CA4-9	0-20	0,330	0,629	0,040	0,092
	20-40	0,260	0,568	0,030	0,053
	40-60	0,210	0,545	0,020	0,049
CA4-40 Ocre	0-5	0,210	1,122	0,030	0,167
CA4-40	0-5	0,760	0,518	0,050	0,060
CA4-40	0-20	1,460	0,730	0,110	0,044
	20-40	0,300	0,655	0,040	0,032
	40-50+	0,290	0,629	0,040	0,067
CA4-41A	0-20	0,290	0,672	0,060	3,675
CA4-41C	0-20	0,680	0,909	0,060	0,111
CA5-1	0-20	0,330	0,535	0,020	0,009
	20-40	0,430	0,516	0,030	0,005
	40-60	0,560	0,551	0,040	0,017
CA5-2	0-20	1,230	0,508	0,060	0,038

	20-40	0,900	0,741	0,060	0,013
	40-60	0,780	0,779	0,070	0,011
CA5-3	0-20	0,310	0,434	0,020	0,005
	20-40	0,600	0,621	0,040	0,023
	40-60	0,670	0,533	0,040	0,044
	60-65	0,730	0,687	0,040	0,537
CA5-4	0-20	1,190	0,756	0,060	0,027
	20-40	0,780	0,511	0,030	0,007
	40-60	0,710	0,558	0,040	0,017
CA5-5	0-20	5,030	1,345	0,610	0,064
	20-40	0,960	0,721	0,070	0,015
	40-60	0,800	0,712	7,320	0,003
CA5-7	0-20	1,170	0,650	0,090	0,028
	20-40	1,000	0,682	0,070	0,021
	40-60	0,940	0,702	0,060	0,013
CA5-42	0-10	0,790	1,788	0,020	5,721
CA5-43	0-20	0,630	0,814	0,060	0,097
	20-40	0,370	0,637	0,020	0,066
	40-60	0,340	0,607	0,020	0,044

Tabela A.14: Valores de fósforo total e assimilável nos solos da área em estudo.

Amostras	Profundidade (cm)	P total (mg.kg <sup>-1</sup> )	P Assimilável (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1B	0-20	75,3594	2,0499
	20-27	76,1848	1,7469
CA0-1C	0-20	66,3209	1,4486
	20-40	82,3553	1,0978
CA0-2C	0-20	102,0255	6,2899
	20-40	76,7544	9,9629
	40-60	138,1140	6,0876
CA0-3B	0-20	64,6552	1,3484
	20-40	53,4093	0,9466
	40-60	66,6667	5,4557
CA0-3C	0-20	59,3759	1,6443
	20-40	67,8767	1,5968
	40-60	64,4060	0,9999
CA1-19	0-20	118,5844	6,0735
	20-30+	152,8786	5,7900
CA1-33	0-20	108,6851	24,3902
	20-40	55,4381	26,3363
	40-60	62,9032	22,3259
CA3-15	0-20	237,0259	47,1005
	20+	244,0028	52,8162
CA3-17	0-20	155,1757	4,0093
	20-40	97,2318	1,1463
	40-50+	66,8129	6,1177
CA4-9	0-20	57,6904	0,9494
	20-40	43,6811	1,0983
	40-60	61,0088	1,0490
CA4-40 Ocre	0-5	16,3407	-
CA4-40	0-5	104,6448	6,2604
CA4-40	0-20	69,9562	18,4854
	20-40	72,8939	5,7139
	40-50+	76,3862	5,7482
CA4-41A	0-20	7,2304	3,3481
CA4-41B	0-20	17,7649	1,3386
CA4-41C	0-20	92,2131	1,0861
CA4-54 [III]	0-20	124,2943	6,3987
	20-40	93,7782	2,5956

	40-60	117,8657	3,3894
CA5-1	0-20	58,0206	6,1041
	20-40	65,0990	5,9885
	40-60	33,6663	5,9263
CA5-2	0-20	132,3106	18,3875
	20-40	52,2966	5,6491
	40-60	46,8393	5,6480
CA5-3	0-20	28,7428	5,5406
	20-40	41,9897	5,8232
	40-60	36,1524	11,7320
	60-65	50,5075	6,3121
CA5-4	0-20	103,3592	5,9883
	20-40	35,2096	5,7834
	40-60	28,1909	5,9223
CA5-5	0-20	180,0868	11,8639
	20-40	122,2786	5,7806
	40-60	107,9155	5,7813
CA5-7	0-20	80,7612	5,7203
	20-40	32,9013	5,7212
	40-60	60,3081	5,4885
CA5-42	0-10	152,7687	-
CA5-43	0-20	813,1970	5,4862
	20-40	86,0399	5,4609
	40-60	26,0391	5,4966

Classificação da Fertilidade do Solo (adaptado de Kepner <i>et al.</i> , 2003)		P (mg.kg <sup>-1</sup> )
Baixo		< 50
Médio		50-100
Alto		100-200
Muito Alto		> 200

Tabela A.15: Valores correspondentes à lixiviação dos solos após uma hora de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por *aqua regia*) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).

Amostras	Profundidade (cm)	pH (solução)	Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	pH Final	Condutividade (µs/cm)
CA0-1C	20-40	6,46	4,4093	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1116	3,2439	0,8040	< 0,02	< 0,02	0,3478	5,99	91
CA0-2C	0-20	6,68	2,0996	< 0,2	0,0537	< 0,02	< 0,02	0,0979	1,3748	1,7702	< 0,02	< 0,02	0,3585	6,21	82
	20-40	6,45	0,0775	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1581	1,5293	< 0,02	8,2808	5,51	112
	40-60	6,45	2,5560	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,5626	0,1228	< 0,02	< 0,02	0,8081	6,00	72
CA0-3C	0-20	6,53	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0205	0,2810	< 0,02	< 0,02	2,2509	6,14	104
	20-40	6,53	1,4704	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,8950	0,1039	0,0440	0,1047	2,8818	6,05	118
	40-60	6,53	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1026	< 0,02	< 0,02	0,5860	6,16	81
CA1-33	0-20	6,46	13,2573	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	8,4578	0,3395	< 0,02	0,3998	27,8432	6,15	125
	20-40	6,50	< 0,02	< 0,2	0,2024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0305	0,2662	< 0,02	0,2172	66,8313	6,02	321
	40-60	6,52	< 0,02	< 0,2	0,6929	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0745	0,5824	< 0,02	< 0,02	153,7043	6,31	492
CA3-15	0-20	6,68	0,5701	9,5531	0,2735	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,3569	0,4092	< 0,02	< 0,02	3,3876	6,75	113
	20+	6,54	< 0,02	12,9001	0,3304	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0837	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,0037	6,85	95
CA4-9	0-20	6,46	4,7037	< 0,2	13,4241	3,0354	< 0,02	< 0,02	0,6692	125,2841	0,8310	< 0,02	960,3219	5,42	357
	40-60	6,46	0,0285	< 0,2	2,9121	1,6128	< 0,02	< 0,02	0,1351	39,7780	0,2624	< 0,02	278,9884	5,63	192
CA4-54 [III]	0-20	6,48	0,4224	< 0,2	0,4187	0,7446	0,0701	0,9286	0,4885	3,6501	0,6727	0,9058	73,0990	6,55	141
	20-40	6,48	0,8109	< 0,2	0,7345	0,7767	0,0512	0,6795	0,1578	2,3239	< 0,02	< 0,02	33,2036	6,30	114
	40-60	6,48	< 0,02	< 0,2	0,6556	0,9059	0,1354	1,0880	0,1865	5,1995	1,3735	< 0,02	62,8625	6,41	128
CA5-1	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0371	0,1029	< 0,02	< 0,02	4,2768	6,59	89
	20-40	6,46	0,3809	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,5166	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,5148	6,26	78
	40-60	6,46	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,2075	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,7136	6,32	118
CA5-2	0-20	6,53	0,6186	< 0,2	0,2309	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1653	0,5300	0,1594	< 0,02	32,5271	6,43	156

	20-40	6,53	0,0474	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0947	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,5731	6,02	78
	40-60	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,8191	6,27	67
CA5-3	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,4947	6,35	59
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	2,0090	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1694	0,5558	< 0,02	< 0,02	58,2952	5,99	84
	40-60	6,53	< 0,02	< 0,2	5,2264	0,4191	< 0,02	< 0,02	0,1261	0,8226	< 0,02	< 0,02	109,9978	6,37	107
	60-65	6,46	< 0,02	< 0,2	30,7411	2,7998	< 0,02	0,1205	< 0,02	1,6545	0,4775	< 0,02	559,5641	6,20	199
CA5-4	0-20	6,54	0,0434	< 0,2	0,1750	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,2818	0,0364	< 0,02	< 0,02	7,2213	6,48	81
	40-60	6,46	9,9098	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	5,7850	0,1161	< 0,02	< 0,02	1,4217	6,19	86
CA5-5	0-20	6,40	4,9105	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	3,7869	3,7066	< 0,02	< 0,02	27,7317	5,03	152
	20-40	6,46	1,0395	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,8247	0,1107	< 0,02	< 0,02	2,3773	5,95	89
	40-60	6,53	0,2835	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,3788	0,2975	< 0,02	< 0,02	2,3990	6,19	102

<b>SOLOS</b> (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela A.16: Valores correspondentes à lixiviação dos solos após três horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por *aqua regia*) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).

Amostras	Profundidade (cm)	pH (solução)	Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	pH Final	Condutividade (µs/cm)
CA0-1C	20-40	6,46	8,4612	< 0,2	0,0226	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,1005	1,7921	< 0,02	< 0,02	0,9775	6,21	94
CA0-2C	0-20	6,68	3,2788	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	3,2747	0,4572	< 0,02	< 0,02	0,0628	6,55	85
	20-40	6,45	0,0496	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1249	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	5,21	71
	40-60	6,45	1,4907	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,9456	0,2578	< 0,02	< 0,02	0,0750	5,78	75
CA0-3C	0-20	6,53	0,7530	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,4834	0,4914	0,0645	< 0,02	3,5412	5,08	124
	20-40	6,53	0,5930	< 0,2	0,2869	0,2416	0,1317	1,6277	1,0255	0,5202	0,1597	0,4205	2,0116	6,11	105
	40-60	6,53	3,6368	< 0,2	0,0441	0,0808	0,0369	0,4495	1,2505	0,4642	0,1582	0,0243	3,0106	5,11	116
CA1-33	0-20	6,46	4,2401	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,6098	0,1167	< 0,02	0,0217	28,9150	6,03	95
	20-40	6,50	< 0,02	< 0,2	0,3338	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,2450	0,2957	< 0,02	< 0,02	77,8056	6,35	278
	40-60	6,52	< 0,02	< 0,2	0,8961	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,8409	< 0,02	< 0,02	189,4467	6,22	612
CA3-15	0-20	6,68	0,4087	11,5101	0,3122	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,3954	0,3272	< 0,02	< 0,02	2,6675	7,02	125
	20+	6,54	0,3591	16,0885	0,4394	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,2898	0,1572	< 0,02	< 0,02	2,3885	7,10	123
CA4-9	0-20	6,46	4,3192	< 0,2	13,4745	3,0714	< 0,02	< 0,02	0,4406	124,7531	0,8367	0,0285	952,0951	5,22	367
	40-60	6,46	0,9595	< 0,2	3,0557	1,6832	< 0,02	< 0,02	0,1754	41,7758	0,2948	0,0908	291,7940	5,43	190
CA4-54 [III]	0-20	6,48	0,0864	< 0,2	0,6619	0,5290	< 0,02	0,9090	< 0,02	2,2185	< 0,02	< 0,02	30,7951	6,15	98
	20-40	6,48	0,1390	< 0,2	0,6192	0,5946	< 0,02	0,8205	< 0,02	4,4984	< 0,02	< 0,02	59,3106	6,45	97
	40-60	6,48	< 0,02	< 0,2	0,4065	0,5631	< 0,02	0,7709	< 0,02	3,3240	< 0,02	0,3998	71,1595	6,29	91
CA5-1	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0712	0,0465	< 0,02	< 0,02	4,3517	6,41	84
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	5,1226	6,54	94
	40-60	6,46	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0600	< 0,02	< 0,02	8,4367	6,51	112
CA5-2	0-20	6,53	6,4651	< 0,2	0,3050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	3,8286	0,7201	< 0,02	< 0,02	29,5507	5,91	114

	20-40	6,53	< 0,02	< 0,2	0,0288	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0599	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,6484	6,18	74
	40-60	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0506	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,7764	5,43	76
CA5-3	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0458	< 0,02	< 0,02	2,4152	5,36	70
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	1,9189	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0815	0,5484	< 0,02	< 0,02	53,2935	6,05	89
	40-60	6,53	< 0,02	< 0,2	6,0594	0,5043	< 0,02	< 0,02	0,0482	0,9711	0,2407	< 0,02	133,4057	5,98	131
	60-65	6,46	< 0,02	< 0,2	33,6974	3,1940	< 0,02	< 0,02	< 0,02	1,8953	0,6475	< 0,02	617,3956	6,34	217
CA5-4	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,4176	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1233	0,1445	0,4752	< 0,02	13,0789	6,42	131
	40-60	6,46	94,7211	< 0,2	0,0506	< 0,02	< 0,02	< 0,02	38,7359	0,2967	< 0,02	< 0,02	2,6611	6,40	89
CA5-5	0-20	6,40	7,7625	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,8190	4,1653	< 0,02	< 0,02	28,9365	5,09	145
	20-40	6,46	7,3703	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	4,4069	0,2458	< 0,02	< 0,02	4,3129	6,22	100
	40-60	6,53	0,3902	< 0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1136	0,1713	< 0,02	< 0,02	2,4217	6,13	101

SOLOS (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	As	Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela A.17: Valores correspondentes à lixiviação dos solos após dezoito horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por *aqua regia*) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).

Amostras	Profundidade (cm)	pH (solução)	Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	pH Final	Condutividade (µs/cm)
CA0-1C	20-40	6,46	0,8050	< 0,2	0,1388	0,0950	0,0612	1,0552	0,5712	0,8945	< 0,02	0,2869	0,8929	6,00	123
CA0-2C	0-20	6,68	13,6242	< 0,2	0,1865	0,2249	0,1507	0,4173	8,7527	3,3304	< 0,02	0,2522	0,5872	6,48	98
	20-40	6,45	19,1795	< 0,2	1,9287	0,1073	0,1388	0,5241	7,0177	0,3506	< 0,02	0,7271	0,3217	5,21	68
	40-60	6,45	< 0,02	< 0,2	0,1396	0,1548	0,0865	0,1580	0,2111	0,3569	0,0554	0,1454	0,4209	5,48	77
CA0-3C	0-20	6,53	0,6009	< 0,2	0,0929	0,1318	0,0666	0,0297	0,5462	0,5019	< 0,02	0,0625	1,6118	6,27	99
	20-40	6,53	6,9889	< 0,2	1,8805	0,1038	0,1472	0,6774	3,6613	0,3437	< 0,02	0,8194	1,3538	5,90	77
	40-60	6,53	0,1911	< 0,2	0,1361	0,2667	0,1083	0,3253	0,6650	0,3884	0,1282	0,1110	0,9260	5,20	89
CA1-33	0-20	6,46	1,4330	< 0,2	2,3516	0,1208	0,1534	1,0570	1,4796	7,3435	< 0,02	1,0144	15,7920	5,89	106
	20-40	6,50	< 0,02	< 0,2	0,5871	1,0652	0,2472	1,4866	0,4174	0,4349	0,9075	0,1935	76,1788	6,07	265
	40-60	6,52	< 0,02	< 0,2	1,1395	0,3254	0,0537	0,4018	0,4486	1,2065	0,2079	< 0,02	222,6273	5,88	554
CA3-15	0-20	6,68	5,7643	19,0521	0,6983	0,0995	0,0477	< 0,02	2,7164	0,6459	< 0,02	< 0,02	4,4548	7,13	102
	20+	6,54	< 0,02	21,9086	0,6976	0,1017	0,0480	< 0,02	0,2295	0,1199	< 0,02	< 0,02	1,8812	7,22	137
CA4-9	0-20	6,46	5,5470	< 0,2	13,2430	3,1208	< 0,02	< 0,02	0,2077	126,4540	0,8961	0,0819	1005,9415	5,44	365
	40-60	6,46	< 0,02	< 0,2	2,7362	1,5663	< 0,02	< 0,02	0,1540	36,6489	0,3106	< 0,02	259,3956	5,40	170
CA4-54 [III]	0-20	6,48	0,1231	< 0,2	0,4365	0,5102	< 0,02	0,7623	< 0,02	3,9125	< 0,02	0,6726	77,2147	6,26	112
	20-40	6,48	0,0930	< 0,2	0,7096	0,7983	< 0,02	0,7844	< 0,02	5,4464	< 0,02	< 0,02	72,7786	6,48	112
	40-60	6,48	0,6877	< 0,2	0,9017	0,8659	< 0,02	1,1042	0,1211	2,9540	< 0,02	0,5097	42,4051	6,47	128
CA5-1	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,0911	0,0850	0,0440	< 0,02	0,2463	0,1201	< 0,02	< 0,02	4,2020	6,78	112
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	0,4178	0,1258	0,2134	< 0,02	0,2301	0,1962	< 0,02	0,3727	5,3931	6,60	117
	40-60	6,46	< 0,02	< 0,2	0,1282	0,0965	0,0285	< 0,02	0,4823	0,2021	< 0,02	< 0,02	7,1234	6,69	107
CA5-2	0-20	6,53	30,8722	< 0,2	0,9103	0,1153	0,1092	0,5153	16,0749	2,4957	< 0,02	0,3169	27,3864	6,34	79

	20-40	6,53	< 0,02	< 0,2	0,2468	0,1011	0,0213	< 0,02	1,0096	0,0726	0,0651	< 0,02	7,3292	6,16	90
	40-60	6,54	< 0,02	< 0,2	0,1269	0,0845	< 0,02	< 0,02	0,1713	0,0495	< 0,02	< 0,02	2,4051	5,90	105
CA5-3	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	4,3705	0,2082	< 0,02	< 0,02	0,2825	7,4301	< 0,02	< 0,02	290,6303	5,55	216
	20-40	6,46	0,4384	< 0,2	2,6714	0,2066	0,0348	< 0,02	0,4101	1,0715	0,1589	0,0205	84,5950	6,20	125
	40-60	6,53	< 0,02	< 0,2	7,1311	0,7608	< 0,02	< 0,02	0,1395	1,1813	0,0827	< 0,02	158,7404	6,19	120
	60-65	6,46	< 0,02	< 0,2	34,4046	3,6356	< 0,02	< 0,02	0,2681	2,1452	0,7458	0,0967	670,4836	6,11	208
CA5-4	0-20	6,54	1,7277	< 0,2	0,5538	0,1012	0,0269	< 0,02	1,2289	0,2276	0,0877	< 0,02	12,2211	6,41	79
	40-60	6,46	200,0376	< 0,2	0,3725	0,1040	0,1298	< 0,02	109,2276	0,9611	< 0,02	0,0428	4,9627	6,35	76
CA5-5	0-20	6,40	8,1760	< 0,2	0,7630	0,1481	0,1096	0,0393	8,5917	4,2417	< 0,02	0,1182	26,0910	6,41	151
	20-40	6,46	8,4561	0,3282	0,5054	0,1014	0,1063	< 0,02	22,3530	1,4426	< 0,02	0,3337	3,4752	5,64	93
	40-60	6,53	7,9507	< 0,2	0,5270	0,1002	0,1076	0,1257	3,7360	6,4011	< 0,02	0,1293	2,2492	6,12	85

SOLOS (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	As	Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela A.18: Valores correspondentes à lixiviação dos solos após vinte e quatro horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por *aqua regia*) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).

Amostras	Profundidade (cm)	pH (solução)	Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	pH Final	Condutividade (µs/cm)
CA0-1C	20-40	6,46	14,3925	< 0,2	0,0571	0,0897	0,0230	< 0,02	6,9946	1,7247	< 0,02	< 0,02	0,5660	6,51	93
CA0-2C	0-20	6,68	10,9775	< 0,2	0,1754	0,0784	0,0924	< 0,02	7,0635	1,4737	< 0,02	< 0,02	0,8463	6,22	81
	20-40	6,45	20,2467	< 0,2	0,3048	0,1052	0,0532	< 0,02	8,5712	15,3269	< 0,02	0,0378	1,0548	5,23	59
	40-60	6,45	7,1532	< 0,2	0,3990	0,0798	0,1278	0,2005	8,6083	1,2243	< 0,02	0,0659	1,4338	5,65	56
CA0-3C	0-20	6,53	18,5816	< 0,2	0,1239	0,1129	0,0893	< 0,02	10,6066	0,7567	< 0,02	< 0,02	3,0117	5,33	82
	20-40	6,53	0,5790	< 0,2	0,0536	0,0960	0,0402	< 0,02	11,7578	0,3792	< 0,02	< 0,02	0,9478	5,96	79
	40-60	6,53	17,8337	< 0,2	0,1471	0,0654	0,0869	1,1837	10,2932	0,5266	0,0606	0,1415	2,3531	5,11	75
CA1-33	0-20	6,46	61,3116	< 0,2	0,1977	0,0992	0,0521	< 0,02	35,9748	1,1932	< 0,02	0,7045	42,3656	6,27	136
	20-40	6,50	< 0,02	< 0,2	0,5124	0,0879	< 0,02	< 0,02	0,1697	0,5624	< 0,02	< 0,02	87,5133	6,33	297
	40-60	6,52	< 0,02	< 0,2	1,1192	0,0905	< 0,02	< 0,02	0,3146	1,3499	< 0,02	< 0,02	198,8263	6,01	637
CA3-15	0-20	6,68	1,1390	19,5637	0,6634	0,0883	< 0,02	< 0,02	0,7509	0,6134	< 0,02	< 0,02	3,7798	6,99	105
	20+	6,54	0,2625	24,1934	0,7342	0,0817	< 0,02	< 0,02	0,2917	0,2112	< 0,02	< 0,02	1,9631	6,92	118
CA4-9	0-20	6,46	5,7349	< 0,2	13,5119	3,2257	< 0,02	< 0,02	0,8257	126,2993	0,9346	0,0922	998,4835	5,28	363
	40-60	6,46	0,2114	< 0,2	3,0180	1,7329	< 0,02	< 0,02	0,3675	41,0733	0,3831	< 0,02	277,9292	5,35	199
CA4-54 [III]	0-20	6,48	0,3073	< 0,2	0,7771	0,7349	< 0,02	1,0249	< 0,02	2,4663	< 0,02	< 0,02	35,4750	6,36	110
	20-40	6,48	1,9659	< 0,2	0,5032	0,8572	0,0407	1,0557	0,8007	4,5261	< 0,02	< 0,02	77,7152	6,33	105
	40-60	6,48	0,0577	< 0,2	0,7012	0,6858	0,0319	0,7284	< 0,02	5,3837	< 0,02	< 0,02	69,9046	6,22	91
CA5-1	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,0825	0,0863	< 0,02	< 0,02	0,0745	0,1821	< 0,02	< 0,02	5,3259	6,60	83
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	0,0869	0,0807	< 0,02	< 0,02	0,4232	0,1513	< 0,02	< 0,02	3,8127	6,78	96
	40-60	6,46	0,0579	< 0,2	0,1207	0,0833	0,0192	< 0,02	0,4025	0,2065	< 0,02	0,0664	5,0537	6,46	93

CA5-2	0-20	6,53	3,4271	< 0,2	0,4515	0,1045	< 0,02	< 0,02	2,3176	0,5194	< 0,02	0,0282	35,8850	6,33	85
	20-40	6,53	0,9359	< 0,2	0,2503	0,0869	< 0,02	< 0,02	0,8523	0,0672	< 0,02	< 0,02	8,7112	6,18	83
	40-60	6,54	< 0,02	< 0,2	0,1095	0,0879	< 0,02	< 0,02	0,0854	0,0378	< 0,02	< 0,02	2,0277	5,22	67
CA5-3	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,0969	0,0849	< 0,02	< 0,02	0,1362	0,2120	< 0,02	< 0,02	2,3890	5,10	65
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	2,6723	0,2113	< 0,02	< 0,02	0,2156	1,1570	< 0,02	< 0,02	82,4210	5,94	89
	40-60	6,53	0,5489	< 0,2	7,4854	0,8050	< 0,02	< 0,02	0,0732	1,2550	0,1510	< 0,02	166,8020	6,07	117
	60-65	6,46	0,0250	< 0,2	40,9565	4,3572	< 0,02	< 0,02	0,0746	2,4856	0,8756	< 0,02	783,8344	6,19	239
CA5-4	0-20	6,54	2,3014	< 0,2	0,6223	0,1006	< 0,02	< 0,02	1,1298	0,2330	< 0,02	< 0,02	13,2670	5,59	85
	40-60	6,46	26,2415	< 0,2	0,1648	0,0872	< 0,02	< 0,02	12,4053	0,5943	< 0,02	< 0,02	1,2992	6,55	100
CA5-5	0-20	6,40	6,3594	< 0,2	0,1606	0,1374	< 0,02	< 0,02	4,4898	5,5615	< 0,02	< 0,02	28,3384	6,40	158
	20-40	6,46	0,5738	< 0,2	0,1383	0,0953	0,0513	< 0,02	0,6886	0,4753	< 0,02	0,1122	5,4206	5,75	114
	40-60	6,53	1,1192	< 0,2	0,0666	0,0905	< 0,02	< 0,02	1,3228	0,4831	< 0,02	< 0,02	2,0185	6,08	112

<b>SOLOS</b> (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela A.19: Valores correspondentes à lixiviação dos solos após quarenta e oito horas de agitação e comparação para os valores legais para extracções parciais (ou por *aqua regia*) (COPAM, 2011; CONAMA, 2012).

Amostras	Profundidade (cm)	pH (solução)	Al (mg.kg <sup>-1</sup> )	As (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	pH Final	Condutividade (µs/cm)
CA0-1C	20-40	6,46	90,5167	< 0,2	0,0618	0,0814	0,0570	< 0,02	49,0775	1,6010	< 0,02	< 0,02	0,6655	6,21	76
CA0-2C	0-20	6,68	10,0559	< 0,2	0,0751	0,0958	0,0537	< 0,02	11,8776	1,2238	< 0,02	< 0,02	0,2655	6,56	73
	20-40	6,45	18,7351	< 0,2	0,0576	0,0922	0,0308	< 0,02	8,3773	0,1132	< 0,02	< 0,02	0,3954	5,55	77
	40-60	6,45	3,5669	< 0,2	0,0513	0,0864	< 0,02	< 0,02	2,8483	0,6548	< 0,02	< 0,02	0,2083	5,54	72
CA0-3C	0-20	6,53	14,0336	< 0,2	0,0636	0,0933	< 0,02	< 0,02	7,8046	0,6389	< 0,02	< 0,02	1,9585	5,94	81
	20-40	6,53	< 0,02	< 0,2	0,0635	0,0997	< 0,02	< 0,02	0,1525	0,4178	< 0,02	< 0,02	1,2347	5,73	64
	40-60	6,53	1,2550	< 0,2	0,0466	0,0925	< 0,02	< 0,02	1,4763	0,3338	< 0,02	< 0,02	0,5130	6,06	66
CA1-33	0-20	6,46	109,7132	< 0,2	0,2123	0,1103	0,0685	< 0,02	52,8445	1,4652	< 0,02	0,9687	46,9537	6,14	121
	20-40	6,50	0,3541	< 0,2	0,5006	0,0945	< 0,02	< 0,02	0,1900	0,6371	0,0317	0,0779	89,1320	6,44	305
	40-60	6,52	0,2757	< 0,2	1,1360	0,0960	< 0,02	< 0,02	0,2347	1,7238	0,0208	< 0,02	206,3266	6,04	634
CA3-15	0-20	6,68	1,5350	22,1993	0,7980	0,0564	< 0,02	< 0,02	0,7525	0,6931	< 0,02	0,0586	4,2326	7,07	112
	20+	6,54	0,6268	28,3361	0,8821	0,0515	< 0,02	< 0,02	0,3628	0,1622	< 0,02	< 0,02	1,9048	7,04	119
CA4-9	0-20	6,46	5,5533	< 0,2	12,9419	3,1114	< 0,02	< 0,02	0,9415	122,5519	0,9626	0,1605	950,6722	5,16	421
	40-60	6,46	0,7293	< 0,2	3,0339	1,6876	< 0,02	< 0,02	0,3875	41,3627	0,5150	0,1805	285,9295	5,69	214
CA4-54 [III]	0-20	6,48	< 0,02	< 0,2	0,5909	0,7314	< 0,02	0,6979	< 0,02	4,7639	< 0,02	0,9411	52,1581	5,48	108
	20-40	6,48	2,2643	< 0,2	0,7101	0,6210	< 0,02	0,5731	0,6008	2,5872	< 0,02	0,0823	31,5846	6,27	100
	40-60	6,48	< 0,02	< 0,2	0,4273	0,7859	< 0,02	0,8158	< 0,02	3,5357	< 0,02	0,1073	59,2758	5,99	94
CA5-1	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,0892	0,0657	< 0,02	< 0,02	0,0498	0,1961	< 0,02	< 0,02	4,7603	6,56	100
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	0,1032	0,0617	< 0,02	< 0,02	0,0837	0,1461	< 0,02	< 0,02	4,5260	6,66	112
	40-60	6,46	< 0,02	< 0,2	0,1036	0,0654	< 0,02	< 0,02	0,0777	0,2960	< 0,02	< 0,02	4,9610	6,65	118

CA5-2	0-20	6,53	10,0116	< 0,2	0,4925	0,0895	< 0,02	< 0,02	5,9427	0,6918	< 0,02	0,1109	48,3317	6,52	104
	20-40	6,53	1,9941	< 0,2	0,2491	0,0663	< 0,02	< 0,02	1,3156	0,0844	< 0,02	< 0,02	6,4889	6,22	93
	40-60	6,54	< 0,02	< 0,2	0,1353	0,0747	< 0,02	< 0,02	0,1045	0,0516	< 0,02	< 0,02	2,0712	6,13	79
CA5-3	0-20	6,54	< 0,02	< 0,2	0,1116	0,0801	< 0,02	< 0,02	0,1352	0,2158	< 0,02	< 0,02	2,7761	6,20	66
	20-40	6,46	< 0,02	< 0,2	3,2260	0,2237	< 0,02	< 0,02	0,0974	1,3646	< 0,02	< 0,02	103,4040	5,91	77
	40-60	6,53	< 0,02	< 0,2	7,6561	0,8625	< 0,02	< 0,02	0,1582	1,2684	0,1053	< 0,02	171,2509	6,15	124
	60-65	6,46	0,0599	< 0,2	43,5333	4,8013	< 0,02	< 0,02	0,0563	2,7623	0,9771	< 0,02	844,4185	6,32	285
CA5-4	0-20	6,54	2,4295	< 0,2	0,5668	0,0851	< 0,02	< 0,02	1,2555	0,2311	< 0,02	< 0,02	11,6189	6,38	83
	40-60	6,46	70,5582	< 0,2	0,2452	0,0860	0,0434	< 0,02	33,6128	0,9279	< 0,02	< 0,02	2,4706	6,65	120
CA5-5	0-20	6,40	4,7844	< 0,2	0,1767	0,1377	< 0,02	< 0,02	3,5802	5,8921	< 0,02	< 0,02	24,7736	6,50	191
	20-40	6,46	1,8129	< 0,2	0,0719	0,0771	< 0,02	< 0,02	0,8542	0,5412	< 0,02	< 0,02	4,0244	5,78	105
	40-60	6,53	0,4371	< 0,2	0,0636	0,0741	< 0,02	< 0,02	0,5505	0,6041	< 0,02	< 0,02	2,2703	6,13	114

SOLOS (COPAM, 2011; CONAMA, 2012)	As	Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
< VRQ	< 8	< 0,4	< 6	< 49	< 21,5	< 19,5	< 46,5
>VRQ e < VP	8,0-15	0,4-1,3	6,0-25	49-60	21,5-30	19,5-72	46,5-300
> VP < VI Industrial	15-150	1,3-20	25-90	60-600	30-130	72-900	300-2000
> VI Industrial	> 150	> 20,0	> 90	> 600	> 130	> 900	> 2000

Tabela A.20: Valores obtidos nos solos da área em estudo para alguns dos principais macro e micronutrientes e comparação com os valores de referência para o uso agrícola.

Amostras	Profundidade (cm)	Macronutrientes				Micronutrientes						
		Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mo (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )
CA0-1B	0-20	45,4953	75,7215	25,7581	2,0499	0,3726	2,8924	113,8724	27,3289	2,1067	0,01	10,4567
	20-27	46,2524	78,0911	24,4218	1,7469	0,2719	1,8665	109,6435	18,8068	1,5753	0,01	8,8767
CA0-1C	0-20	50,8855	83,3651	25,8348	1,4486	0,2154	1,6432	90,2042	28,5706	1,4298	0,01	7,9932
CA0-2C	20-40	8,1248	44,5163	9,4200	9,9629	0,2518	1,2440	39,7218	9,7925	1,1124	0,0100	4,2626
	40-60	281,9055	41,2623	42,0026	6,0876	0,0469	0,5162	9,2546	51,0538	0,8442	0,0100	2,0334
CA0-3B	0-20	86,5239	61,7363	27,0388	1,3484	0,1568	1,1012	48,2396	17,1954	0,6689	0,0256	110,7784
	20-40	18,2450	36,6768	11,4191	0,9466	0,5503	0,7533	32,8105	7,6707	0,8679	0,0100	19,0680
	40-60	9,5457	30,3365	13,6667	5,4557	0,6573	0,5937	18,8513	5,4352	0,5742	0,0100	10,9153
CA0-3C	20-40	45,3608	95,3662	16,8436	1,5968	0,3553	0,8917	88,4588	12,0764	0,5836	0,0100	29,9288
	40-60	29,9397	97,6134	17,6083	0,9999	0,2939	0,6634	57,4794	9,3964	0,5374	0,01	24,4706
CA1-19	0-20	428,6659	82,2652	67,5427	6,0735	0,1473	1,1744	69,7642	60,0735	0,5422	0,0100	382,9421
	20-30+	78,5876	38,4246	19,3122	5,7900	0,4232	1,1334	73,8702	22,8793	0,4987	0,0100	25,1958
CA1-33	0-20	762,1495	229,9501	54,6598	24,3902	0,7458	52,6866	64,8560	92,3670	0,1777	0,7653	8915,8661
	40-60	2532,1275	94,4771	38,8474	22,3259	0,3229	76,5438	28,4164	44,9234	0,2575	0,3593	8676,4143
CA3-17	0-20	297,6027	76,4972	44,7905	4,0093	0,2018	4,3255	20,3749	68,4159	0,3669	0,3492	1207,1248
	20-40	87,4390	41,8675	28,2099	1,1463	0,5035	1,6345	45,5366	23,7857	0,4371	0,0100	91,8115
	40-50+	141,7891	37,9589	36,8408	6,1177	0,4978	4,1504	47,6271	39,9429	0,3862	0,0427	118,4615
CA4-9	20-40	49,0589	21,1499	70,5222	1,0983	2,6142	0,3418	6,2542	74,6525	0,3502	0,7231	396,1809
CA4-40	0-20	1131,2385	46,4736	52,7438	18,4854	0,1409	7,1902	29,6617	58,7742	0,2986	0,8002	1596,8082
	20-40	386,2826	137,1009	53,4028	5,7139	0,5429	16,9357	72,9283	46,4301	0,4121	0,5544	614,8131

CA4-41A	0-20	140,5818	21,1026	41,9140	3,3481	1,5217	4,7723	68,9628	82,2503	0,3708	0,8732	586,2310
CA4-41C	0-20	203,5026	46,8682	33,3367	1,0861	0,2794	0,6978	19,5999	24,9263	0,3517	0,0829	289,0471
CA4-54 [III]	0-20	145,3511	41,3513	28,9471	6,3987	0,1281	42,8281	21,1985	24,3257	0,2891	0,4258	2472,3433
	20-40	191,2022	48,1787	42,0167	2,5956	0,1370	44,2175	31,7060	26,1775	0,2366	0,4233	3249,5851
	40-60	464,3364	39,2117	73,4813	3,3894	0,2560	24,2706	29,1845	31,8905	0,3185	0,4801	4689,6890
CA5-1	0-20	591,3481	45,8768	79,0223	6,1041	0,1104	29,0164	33,0122	38,7907	0,2302	0,5515	5490,2514
	20-40	535,1854	33,9782	51,2263	5,9885	0,1728	22,9709	26,0666	26,7036	0,2059	0,4816	3966,7625
	40-60	389,6467	49,3628	32,8618	5,9263	0,0100	2,2729	16,6143	1,6176	0,4141	0,0100	374,5903
CA5-2	20-40	262,8999	35,0814	25,8578	5,6491	0,0100	0,9008	10,9842	0,9063	0,3890	0,0100	43,5450
	40-60	35,4528	23,4319	10,6157	5,6480	0,1125	0,6779	1,5033	2,4920	0,2028	0,0100	48,7434
CA5-3	0-20	129,0666	42,7685	28,6399	5,5406	0,6816	76,3740	10,7285	16,2261	0,3749	0,4418	609,3222
	60-65	1144,5378	44,7755	348,1660	6,3121	1,2042	30,0011	58,1122	65,5358	0,2601	0,3088	353,8551
CA5-4	20-40	111,0712	39,6273	22,3967	5,7834	0,6711	63,6147	38,8554	23,7366	0,2200	0,3009	3916,6260
CA5-5	0-20	1084,8590	181,9973	98,8788	11,8639	1,6452	8,2714	404,0154	105,9142	0,3919	0,0100	685,8933
	20-40	366,4549	54,4828	36,9299	5,7806	0,5895	3,9989	65,3708	24,8894	0,2904	0,0100	161,5979
	40-60	451,0761	54,3569	40,9592	5,7813	0,3892	3,5029	73,9096	38,0042	0,4157	0,0100	132,5996
CA5-7	0-20	302,4728	101,6771	46,5185	5,7203	0,0100	7,5122	23,1209	56,1432	0,3317	0,0100	479,7675
	20-40	67,2356	35,1108	14,4280	5,7212	0,1528	1,7296	49,0596	13,2056	0,3953	0,0100	29,5150
	40-60	47,0399	25,7015	8,3928	5,4885	0,0827	1,2893	26,9592	7,7372	0,3297	0,0100	19,1747
CA5-43	20-40	111,8991	130,4595	30,7906	5,4609	1,5471	1,7786	101,9862	33,8916	0,3765	0,3942	101,9577
	40-60	98,0593	135,9534	37,3613	5,4966	0,7774	1,9116	102,0873	34,9988	0,3224	0,3570	62,9892

Classificação da Fertilidade do Solo		Ca <sup>(1)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	K <sup>(2)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mg <sup>(2)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	P <sup>(3)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )
Baixa	Amarelo	< 300	< 150	< 60	< 50
Ótimo	Verde claro	-	150-250	60-300	50-100
Elevada	Verde escuro	-	250-800	> 300	100-200
Excessivo	Vermelho	-	> 800	-	> 200

Classificação da Fertilidade do Solo		Co <sup>(4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cu <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Fe <sup>(1; 6)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mn <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mo <sup>(1; 4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ni <sup>(4)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Zn <sup>(1; 5)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )
Baixa	Amarelo	-	< 0,2	< 2	< 2	< 0,2	-	< 0,6
Ótimo	Verde claro	-	0,2-5	2-13	2-50	-	-	0,6-5
Elevada	Verde escuro	-	5-15	13-25	50-500	-	-	5-15
Excessivo	Vermelho	> 35	> 15	> 25	> 500	> 50	> 70	> 15

Teores adaptados de:

<sup>1)</sup> *Department of Agriculture & Cooperation, Government of India;*

<sup>2)</sup> *Horneck et al. (2011);*

<sup>3)</sup> *Kepner et al. (2003)*

<sup>4)</sup> *CONAMA (2012);*

<sup>5)</sup> *Loch (2006);*

<sup>6)</sup> *Dafonte et al. (2010).*



Tabela A.21: Valores obtidos na análise textural dos solos da área em estudo e respectiva classificação segundo o diagrama triangular de Atterberg.

Amostras	Profundidade (cm)	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)	Diagrama Triangular de Atterberg
CA0-1B	0-20	34,967	11,058	53,975	Argiloso
	20-27	48,676	6,963	44,361	Argilo-Arenoso
CA0-1C	0-20	37,453	16,614	45,933	Argiloso
	20-40	32,203	18,805	48,992	Argiloso
CA0-2C	0-20	33,723	19,426	46,851	Argiloso
	20-40	33,786	19,089	47,125	Argiloso
	40-60	31,146	18,948	49,906	Argiloso
CA0-3B	0-20	21,720	19,041	59,239	Argiloso
	20-40	17,730	23,962	58,308	Argiloso
	40-60	16,959	23,877	59,164	Argiloso
CA0-3C	0-20	23,724	45,821	30,456	Franco-Argiloso
	20-40	23,616	18,300	58,084	Argiloso
	40-60	23,539	21,774	54,687	Argiloso
CA1-19	0-20	14,096	27,388	58,517	Argiloso
	20-30+	21,426	29,960	48,614	Argiloso
CA1-33	0-20	17,100	31,035	51,864	Argiloso
	20-40	34,635	36,002	29,363	Franco-Argiloso
	40-60	57,910	20,766	21,324	Franco-Argilo-Arenoso
CA3-15	0-20	81,792	9,232	8,976	Areia Franca
	20+	10,242	49,222	40,536	Argilo-Siltoso
CA3-17	0-20	35,450	25,149	39,401	Franco-Argiloso
	20-40	31,136	22,839	46,025	Argiloso
	40-50+	30,810	23,445	45,746	Argiloso
CA4-9	0-20	15,487	34,646	49,867	Argiloso
	20-40	20,082	40,626	39,292	Franco-Argiloso
	40-60	25,773	37,356	36,871	Franco-Argiloso
CA4-40 Ocre	0-5	-	-	-	-
CA4-40	0-5	36,418	33,784	29,799	Franco-Argiloso
CA4-40	0-20	25,485	30,188	44,327	Argiloso
	20-40	16,366	38,037	45,597	Argiloso
	40-50+	23,762	24,529	51,709	Argiloso
CA4-41A	0-20	35,618	25,918	38,464	Franco-Argiloso
CA4-41B	0-20	-	-	-	-
CA4-41C	0-20	29,130	28,566	42,304	Argiloso
CA4-54 [III]	0-20	56,206	21,515	22,278	Franco-Argilo-Arenoso

	20-40	46,870	28,372	24,758	Franco
	40-60	40,586	32,089	27,325	Franco-Argiloso
CA5-1	0-20	33,554	32,454	33,992	Franco-Argiloso
	20-40	88,487	4,409	7,104	Arenoso
	40-60	40,628	27,358	32,014	Franco-Argiloso
CA5-2	0-20	39,998	33,013	26,989	Franco
	20-40	26,552	16,370	57,077	Argiloso
	40-60	22,763	14,960	62,277	Muito Argiloso
CA5-3	0-20	50,757	30,709	18,534	Franco
	20-40	30,316	21,661	48,023	Argiloso
	40-60	39,973	26,391	33,636	Franco-Argiloso
	60-65	44,161	23,745	32,094	Franco-Argiloso
CA5-4	0-20	22,217	29,863	47,920	Argiloso
	20-40	40,474	21,974	37,552	Franco-Argiloso
	40-60	40,031	21,796	38,173	Franco-Argiloso
CA5-5	0-20	5,192	37,403	57,405	Argiloso
	20-40	19,655	23,741	56,603	Argiloso
	40-60	29,656	21,552	48,792	Argiloso
CA5-7	0-20	39,499	22,926	37,575	Franco-Argiloso
	20-40	34,360	19,115	46,525	Argiloso
	40-60	29,916	16,560	53,524	Argiloso
CA5-42	0-10	-	-	-	-
CA5-43	0-20	36,527	17,009	46,464	Argiloso
	20-40	42,577	18,928	38,495	Franco-Argiloso
	40-60	36,211	22,304	41,485	Argiloso

Tabela A.22: Valores de densidade aparente, densidade das partículas e porosidade das amostras de solo da área em estudo.

Amostras	Profundidade (cm)	Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidade das Partículas (g.cm <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)
CA0-1B	0-20	1,609	2,616	38,479
	20-27	1,905	2,592	26,512
CA0-1C	0-20	1,640	2,592	36,757
	20-40	1,714	2,623	34,646
CA0-2C	0-20	1,689	2,580	34,563
	20-40	1,774	2,739	35,226
	40-60	1,605	2,631	38,984
CA0-3B	0-20	1,534	2,647	42,057
	20-40	1,619	2,661	39,149
	40-60	1,596	2,636	39,473
CA0-3C	0-20	1,616	2,612	38,146
	20-40	1,667	2,708	38,449
	40-60	1,639	2,660	38,363
CA1-19	0-20	1,468	2,528	41,9138
	20-30+	1,543	2,682	42,4594
CA1-33	0-20	1,381	3,105	55,520
	20-40	1,345	2,989	55,003
	40-60	1,532	2,960	48,250
CA3-15	0-20	1,989	2,785	28,602
	20+	1,959	2,850	31,255
CA3-17	0-20	1,505	2,642	43,039
	20-40	1,540	2,796	44,913
	40-50+	1,534	2,676	42,663
CA4-9	0-20	1,887	2,726	30,800
	20-40	1,643	2,691	38,956
	40-60	1,588	2,740	42,031
CA4-40	0-5	1,728	2,753	37,243
CA4-40	0-20	1,678	2,734	38,609
	20-40	1,584	2,786	43,163
	40-50+	1,636	2,765	40,838
CA4-41A	0-20	1,638	2,945	44,363
CA4-41B	0-20	-	-	-
CA4-41C	0-20	1,759	2,361	25,497
CA4-54 [III]	0-20	1,618	2,730	40,731
	20-40	1,691	2,780	39,162
	40-60	1,643	2,648	37,949

CA5-1	0-20	1,936	2,695	28,177
	20-40	1,934	2,666	27,447
	40-60	1,724	2,622	34,276
CA5-2	0-20	1,559	2,588	39,774
	20-40	1,726	2,698	36,026
	40-60	1,769	2,947	39,975
CA5-3	0-20	1,713	2,709	36,762
	20-40	1,598	2,683	40,449
	40-60	1,731	2,768	37,455
	60-65	1,815	3,001	39,508
CA5-4	0-20	1,591	2,727	41,650
	20-40	1,755	2,793	37,173
	40-60	1,868	2,732	31,635
CA5-5	0-20	1,259	2,599	51,541
	20-40	1,699	2,553	33,457
	40-60	1,697	2,717	37,562
CA5-7	0-20	1,590	2,634	39,638
	20-40	1,580	2,791	43,383
	40-60	1,525	2,800	45,543
CA5-42	0-10	-	-	-
CA5-43	0-20	1,698	2,645	35,813
	20-40	1,801	2,810	35,886
	40-60	1,827	2,787	34,435

Tabela A.23: Factor de Enriquecimento (FE) calculado para todas as amostras de solos da área em estudo.

		Factor de Enriquecimento								
		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
CA1-19	0-20	10,65	12,17	1,92	1,03	0,59	1,16	1,03	2,04	7,53
	20-30+	0,30	0,06	1,23	1,08	0,49	0,56	0,75	0,71	1,37
CA1-33	0-20	25,67	21,22	1,28	0,34	2,70	1,52	0,58	94,56	133,00
	20-40	30,35	13,35	1,24	0,27	2,77	1,54	0,45	99,24	126,02
	40-60	34,32	15,29	1,34	0,27	2,84	1,85	0,51	87,06	133,35
CA3-15	0-20	5476,16	1033,69	1,95	0,69	18,05	7,13	2,10	27,27	184,74
	20+	6193,03	778,59	2,96	0,69	28,19	6,84	2,19	27,16	167,88
CA3-17	0-20	9,46	68,10	0,86	3,76	1,26	1,80	0,83	7,13	20,62
	20-40	21,65	6,18	1,43	0,97	0,60	0,86	1,08	1,31	3,21
	40-50+	4,78	18,74	1,89	0,89	0,68	1,24	1,06	3,09	3,94
CA4-9	0-20	0,34	40,56	1,61	0,64	0,39	0,66	0,75	0,68	8,10
	20-40	8,50	30,14	7,26	0,54	0,42	1,64	0,87	1,31	6,00
	40-60	0,33	27,81	8,34	0,43	0,32	2,10	0,62	1,91	4,45
CA4-40 Ocre	0-5	0,10	20,87	0,03	1,73	1,62	0,07	0,31	1,14	2,73
CA4-40	0-5	0,36	141,27	3,30	1,18	3,38	3,93	1,13	29,68	72,17
CA4-40	0-20	0,45	208,75	1,89	1,56	2,54	2,17	1,45	8,36	33,49
	20-40	0,54	67,28	2,18	1,75	3,35	2,36	2,02	8,68	20,83
	40-50+	0,37	37,87	1,65	1,04	2,08	2,71	1,09	9,86	10,26
CA4-41A	0-20	9,38	0,03	0,00	0,32	1,41	0,18	0,18	1,70	3,49
CA4-41B	0-20	347,82	43,07	3,71	33,39	15,91	2,91	0,08	104,75	9,48
CA4-41C	0-20	0,29	0,06	37,95	1,27	70,81	0,29	1,18	0,83	5,04
CA4-54 [III]	0-20	11,23	34,82	3,20	0,76	5,69	3,45	1,57	130,81	109,43
	20-40	0,37	44,29	3,24	1,13	4,38	2,31	1,05	63,39	59,86

	40-60	0,32	58,82	3,74	1,53	3,69	2,56	1,38	57,96	50,09
CA5-1	0-20	60,76	63,88	2,46	0,72	1,41	3,60	1,42	57,38	171,98
	20-40	31,13	68,22	2,52	0,68	2,04	5,16	1,33	66,06	174,58
	40-60	30,70	62,77	2,12	0,79	1,78	2,64	1,29	21,01	145,71
CA5-2	0-20	425,40	361,24	8,72	0,70	23,86	9,23	1,58	149,42	400,09
	20-40	0,48	115,15	0,51	0,83	0,75	0,27	0,95	0,96	10,93
	40-60	0,44	11,99	0,49	0,82	0,60	0,25	0,92	0,66	2,08
CA5-3	0-20	0,62	14,79	0,72	0,66	0,57	0,36	0,89	0,86	2,05
	20-40	43,91	165,61	6,43	0,88	3,84	1,26	1,05	3,00	14,55
	40-60	422,13	566,25	8,82	0,93	29,60	2,66	2,17	18,67	228,37
	60-65	1364,33	28611,15	3,11	0,87	7,18	15,29	8,96	124,16	1422,76
CA5-4	0-20	86,48	513,79	3,87	0,84	6,56	1,35	1,59	9,40	57,17
	20-40	2,89	169,63	1,31	0,69	1,21	0,97	1,00	3,34	11,12
	40-60	0,57	219,60	1,25	0,72	1,07	0,90	0,88	7,31	10,35
CA5-5	0-20	25,02	48,43	1,63	1,05	0,99	1,06	1,04	8,64	19,31
	20-40	0,48	10,31	2,20	0,85	0,69	0,62	1,19	2,14	7,60
	40-60	0,52	7,67	2,00	0,91	0,66	0,77	1,18	2,01	6,11
CA5-7	0-20	0,41	46,38	0,72	0,55	0,66	1,57	0,67	5,61	9,38
	20-40	0,40	1,43	0,62	0,57	0,43	0,33	0,66	0,75	1,05
	40-60	0,38	0,66	0,66	0,61	0,43	0,24	0,67	0,63	0,92
CA5-42	0-10	327719,81	1045359,10	6795,73	2,89	21441,43	66,93	912,10	4984,60	29276,32
CA5-43	0-20	0,24	59,33	0,78	0,92	3,91	0,24	0,86	1,23	5,44
	20-40	0,36	82,41	2,54	0,99	2,85	1,02	1,01	0,57	4,94
	40-60	0,29	49,77	0,87	0,83	2,23	0,70	0,73	0,45	3,09

<b>Categorias Factor de Enriquecimento</b>	
< 2	Depleção ou Enriquecimento Mínimo
2-5	Enriquecimento Moderado
5-20	Enriquecimento Significativo
20-40	Enriquecimento Muito Elevado
> 40	Enriquecimento Extremamente Elevado



Tabela A.24: Índice de Geoacumulação calculado para todas as amostras de solos da área em estudo.

		Índice de Geoacumulação (IGL)									
		IGL As	IGL Cd	IGL Co	IGL Cr	IGL Cu	IGL Fe	IGL Mn	IGL Ni	IGL Pb	IGL Zn
CA1-19	0-20	4,35	4,54	1,88	0,98	0,19	0,94	1,15	0,98	1,97	3,85
	20-30+	-0,37	-2,69	1,65	1,46	0,31	1,35	0,53	0,94	0,86	1,81
CA1-33	0-20	7,32	7,05	3,00	1,08	4,07	2,64	3,24	1,84	9,20	9,70
	20-40	8,04	6,85	3,42	1,25	4,58	3,12	3,73	1,95	9,75	10,09
	40-60	7,81	6,64	3,13	0,80	4,21	2,71	3,59	1,73	9,15	9,77
CA3-15	0-20	13,34	10,93	1,88	0,38	5,09	0,92	3,75	1,99	5,69	8,45
	20+	13,38	10,39	2,35	0,25	5,60	0,79	3,56	1,92	5,55	8,18
CA3-17	0-20	4,32	7,16	0,86	2,98	1,41	1,07	1,92	0,80	3,91	5,44
	20-40	4,99	3,18	1,07	0,52	-0,17	0,56	0,34	0,67	0,95	2,24
	40-50+	2,95	4,92	1,61	0,52	0,14	0,69	1,00	0,77	2,32	2,67
CA4-9	0-20	-0,37	6,52	1,87	0,53	-0,18	1,18	0,57	0,77	0,63	4,20
	20-40	3,90	5,72	3,67	-0,07	-0,44	0,81	1,52	0,61	1,20	3,39
	40-60	-0,37	6,02	4,28	-0,01	-0,43	1,22	2,30	0,54	2,16	3,38
CA4-40 Ocre	0-5	-0,37	7,30	-2,25	3,70	3,61	2,92	-0,87	1,24	3,10	4,36
CA4-40	0-5	-0,37	8,24	2,82	1,33	2,86	1,10	3,07	1,28	5,99	7,27
CA4-40	0-20	-0,37	8,47	1,69	1,41	2,11	0,77	1,89	1,30	3,83	5,83
	20-40	-0,37	6,58	1,63	1,31	2,25	0,50	1,74	1,52	3,62	4,88
	40-50+	-0,37	6,30	1,79	1,11	2,12	1,06	2,50	1,18	4,36	4,42
CA4-41A	0-20	5,46	-2,69	-5,81	0,59	2,73	2,23	-0,21	-0,24	3,00	4,04
CA4-41B	0-20	4,30	1,28	-2,25	0,92	-0,15	-4,14	-2,60	-7,73	2,57	-0,90
CA4-41C	0-20	-0,37	-2,69	6,67	1,77	7,57	1,43	-0,34	1,66	1,15	3,76
CA4-54 [III]	0-20	4,56	6,20	2,75	0,68	3,58	1,07	2,86	1,72	8,11	7,85

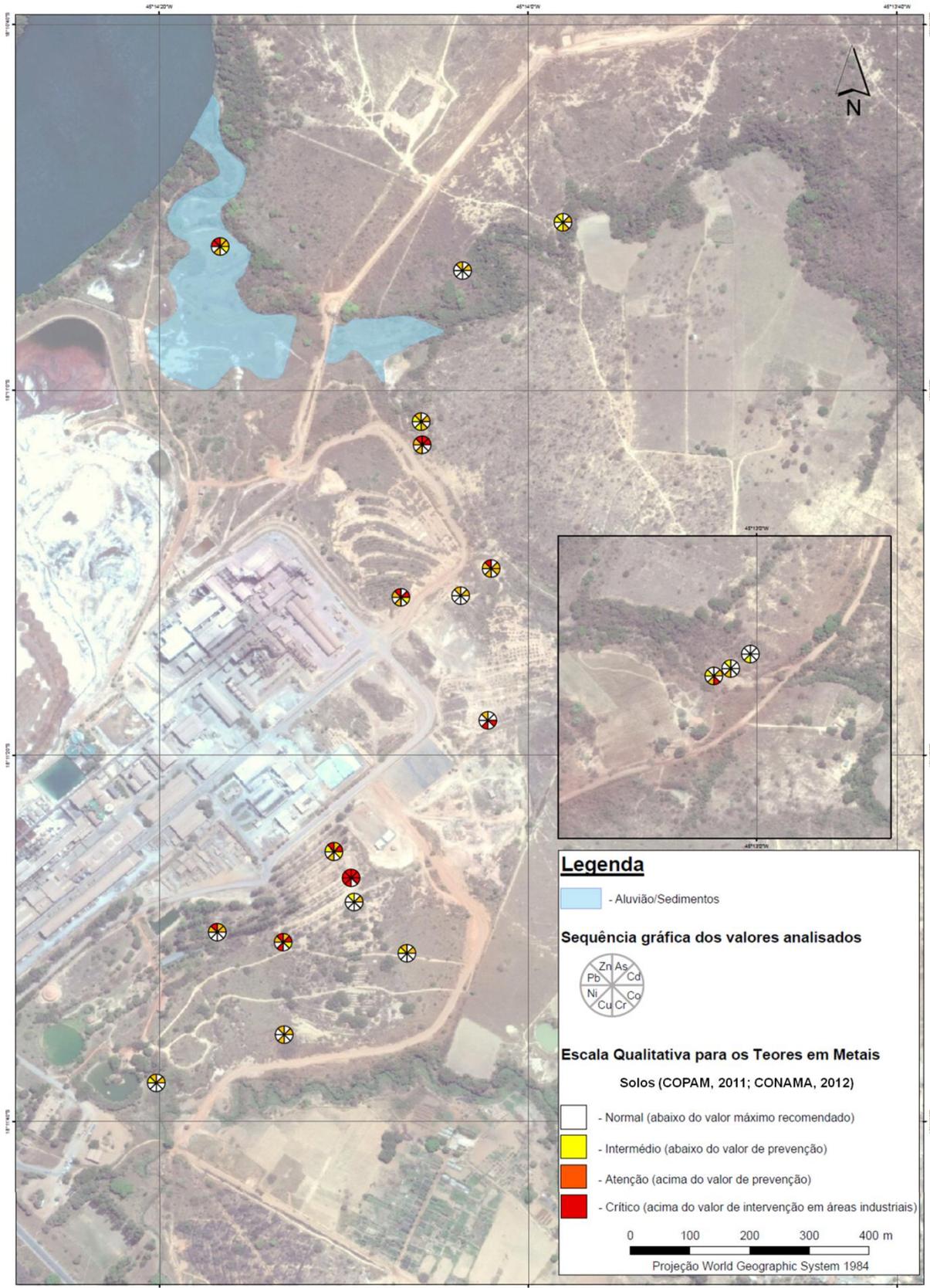
	20-40	-0,37	6,55	2,78	1,25	3,21	1,08	2,29	1,15	7,06	6,98
	40-60	-0,37	7,17	3,19	1,90	3,17	1,29	2,64	1,75	7,14	6,93
CA5-1	0-20	6,54	6,62	1,92	0,14	1,12	0,62	2,47	1,13	6,46	8,05
	20-40	5,61	6,74	1,99	0,10	1,68	0,65	3,02	1,06	6,70	8,10
	40-60	5,51	6,55	1,66	0,24	1,40	0,57	1,97	0,94	4,97	7,76
CA5-2	0-20	9,24	9,01	3,63	0,00	5,09	0,51	3,72	1,17	7,73	9,16
	20-40	-0,37	7,53	-0,29	0,41	0,27	0,68	-1,23	0,61	0,62	4,13
	40-60	-0,37	4,40	-0,22	0,52	0,09	0,81	-1,22	0,69	0,22	1,87
CA5-3	0-20	-0,37	4,20	-0,16	-0,28	-0,50	0,31	-1,18	0,14	0,09	1,35
	20-40	6,04	7,95	3,27	0,39	2,52	0,58	0,92	0,65	2,16	4,44
	40-60	9,16	9,58	3,58	0,33	5,33	0,44	1,85	1,56	4,66	8,27
	60-65	11,02	15,41	2,24	0,41	3,45	0,61	4,54	3,77	7,56	11,08
CA5-4	0-20	7,03	9,60	2,55	0,34	3,31	0,60	1,03	1,27	3,83	6,43
	20-40	1,89	7,76	0,75	-0,18	0,63	0,36	0,31	0,36	2,10	3,83
	40-60	-0,37	8,23	0,76	-0,02	0,54	0,45	0,30	0,26	3,32	3,82
CA5-5	0-20	5,40	6,35	1,46	0,82	0,74	0,75	0,84	0,81	3,87	5,03
	20-40	-0,37	4,06	1,83	0,46	0,15	0,69	-0,01	0,94	1,79	3,62
	40-60	-0,37	3,52	1,58	0,45	-0,02	0,58	0,19	0,82	1,58	3,19
CA5-7	0-20	-0,37	6,45	0,44	0,05	0,31	0,92	1,57	0,35	3,40	4,15
	20-40	-0,37	1,48	0,27	0,16	-0,24	0,96	-0,65	0,37	0,54	1,04
	40-60	-0,37	0,42	0,44	0,31	-0,19	1,03	-1,00	0,46	0,36	0,91
CA5-42	0-10	15,24	16,91	9,65	-1,55	11,31	-3,08	2,98	6,75	9,20	11,76
CA5-43	0-20	-0,37	7,57	1,31	1,56	3,65	1,68	-0,37	1,46	1,97	4,12
	20-40	-0,37	7,46	2,44	1,07	2,60	1,09	1,12	1,10	0,29	3,40
	40-60	-0,37	7,05	1,20	1,14	2,57	1,41	0,90	0,95	0,27	3,04

<b>Categorias Índice de Geoacumulação</b>	
< 0	Não Contaminado
0-1	Não Contaminado a Moderadamente Contaminado
1-2	Moderadamente Contaminado
2-3	Moderadamente a Altamente Contaminado
3-4	Altamente Contaminado
4-5	Altamente a Extremamente Contaminado
> 5	Extremamente Contaminado



## **Anexo 2: Mapas**





	<b>Recuperação Ambiental do Córrego Consciência e Área Envolvente</b>	Data Junho/2014
	Distribuição de teores entre 0m e 0,2m de profundidade	

Figura A.1: Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 0 e os 20 cm.



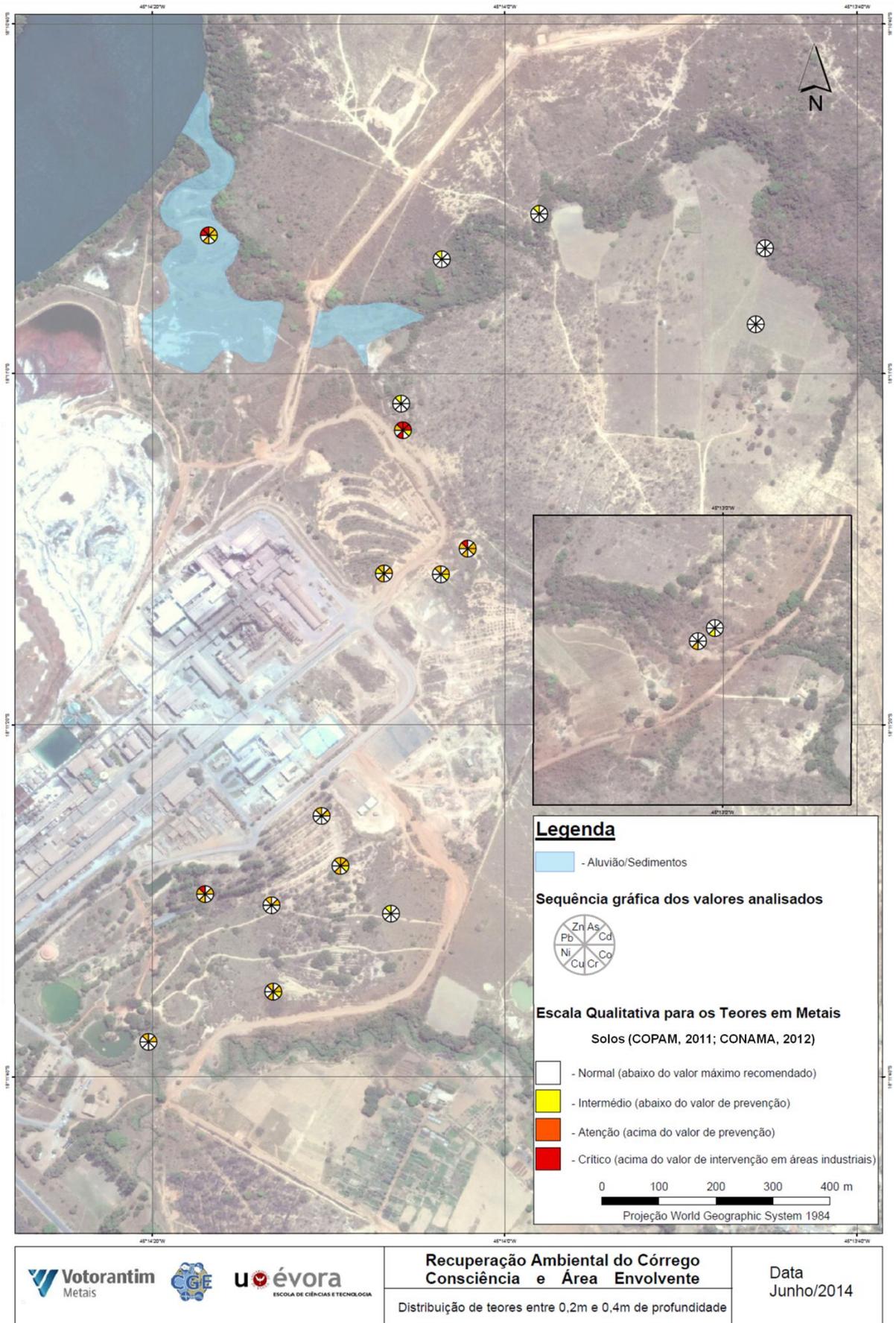


Figura A.2: Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 20 e os 40 cm.



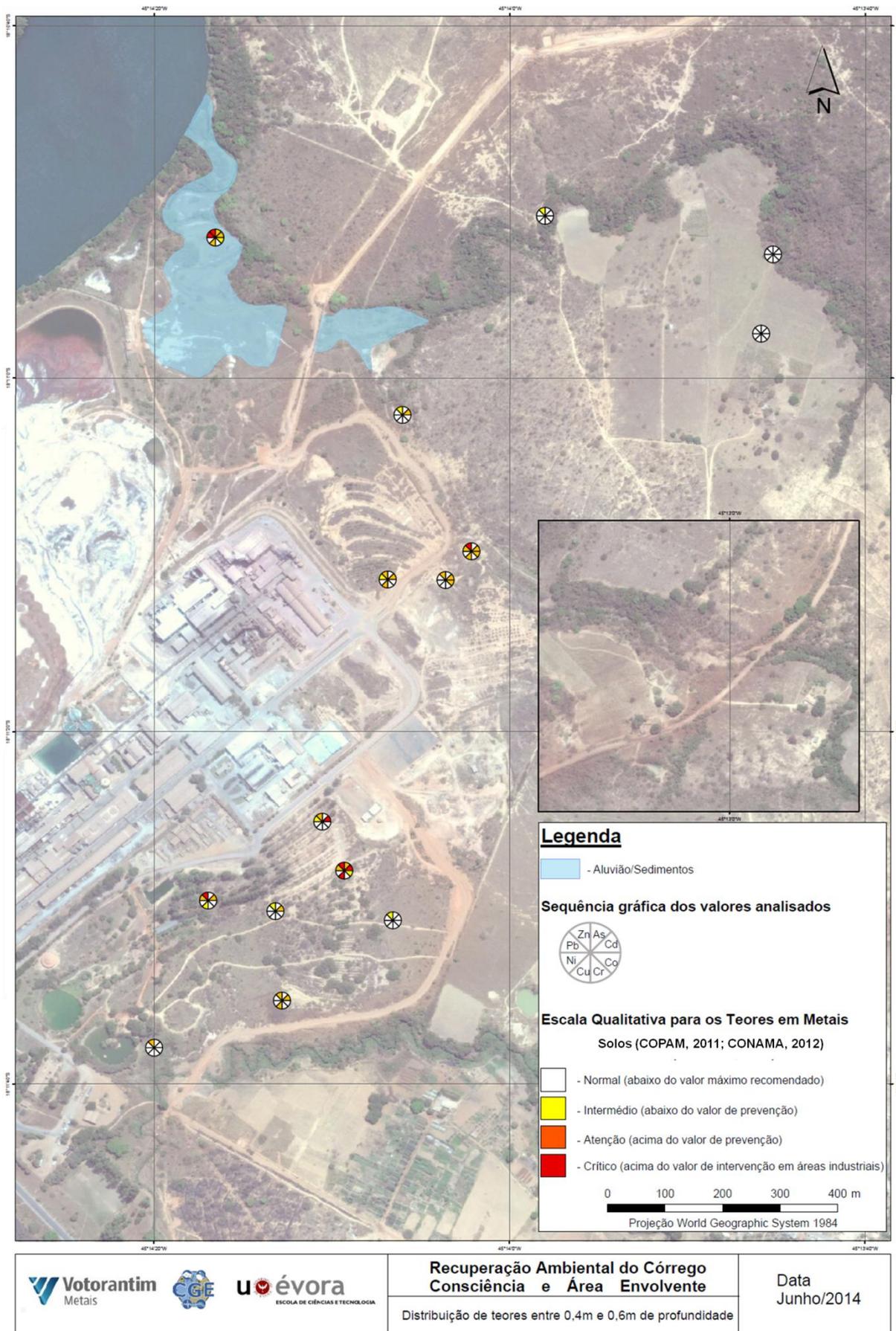


Figura A.3: Distribuição dos teores nos principais metalóides e metais pesados analisados, para profundidades entre os 40 e os 60 cm.