

**ESTUDO GEOFÍSICO E GEOQUÍMICO DA
MOBILIZAÇÃO DE ELEMENTOS E COMPOSTOS
QUÍMICOS EM ÁREA DEGRADADA UTILIZADA
PARA A DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA.**

TESE DE DOUTORADO N° 93

RICARDO COSME ARRAES MOREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Geraldo Resende Boaventura

Brasília-DF



ESTUDO GEOFÍSICO E GEOQUÍMICO DA MOBILIZAÇÃO DE ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS EM ÁREA DEGRADADA UTILIZADA PARA A DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.

TESE DE DOUTORADO

RICARDO COSME ARRAES MOREIRA

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura (Orientador)

Professora Dra. Adriana Maria Coimbra Horbe (Examinadora Externa)

Professor Dr. Augusto César B. Pires (Examinador Interno)

Professor Dr. Éder de Souza Martins (Examinador Externo)

Professor Dr. José Elói Guimarães Campos (Examinador Interno)

Professor Dr. Detlef Hans Gert Walde (Examinador Interno – Suplente)

Brasília-DF



*Dedico este trabalho à minha família e
aos meus colegas da Caesb e UnB.*



Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pela oportunidade de ampliar os conhecimentos e descobrir novos caminhos.

À Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb), pela liberação parcial de meus encargos, financiamento e constante suporte durante o desenvolvimento deste trabalho. Em especial as Superintendências PHI, PMA e PPA.

À Água & Terra Consultoria Ambiental pelo apoio nas tarefas de campo.

Ao meu orientador Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura, pela confiança, orientação e estímulo em todo o período que trabalhamos juntos.

Aos responsáveis pelos laboratórios de Geoquímica, Raios X e Geofísica da UnB, em especial ao pessoal técnico, Renato, Fortes e Fernando, pelo auxílio prestado durante as análises.

Aos colegas da Caesb, Gilmar Lopes, Luciano Almeida, Otávio, Milton Araújo, Sandra Nunes, Ghughu, Rubervaldo Arruda, Alessandra Momesso, Sílvia Cruvinel, Christiane Pinna, Cristine Cavalcanti, Vera Regina, Cláudia Morato, Marina, José “Bradock” Maria, Márcia Morato, Augusto Hosanna, Fernando Starling, Sérgio Colares, Zoé Pereira e Lúcio “Shrek” Magalhães, pelo auxílio de todas as horas. A todos os colegas de laboratório que, de várias formas, procuraram viabilizar esse trabalho.

Aos amigos Maria Auxiliadora e Fred pelo incentivo.

A todos os amigos da Pós, em especial ao Alexandre “Toyota” e aos professores Edi Mendes, Elói e Carlos Tadeu, por todas as dicas e pela possibilidade de uma agradável convivência e troca de experiências. Ao bolsista Rodolfo pelo trabalho em conjunto nas primeiras etapas.

A todos os Professores do Instituto de Geociências pelo aprendizado que me possibilitaram concluir mais uma etapa da minha vida acadêmica.

Aos Doutores Márcio Nakanishi, Luís Augusto Dias e Carlos Adriano, pela segunda chance.

Aos meus familiares pela força, apoio e incentivo constante.

A minha esposa Brígida e ao meu filho Renato pela paciência, companheirismo, auxílio no acabamento das figuras (no caso do Renato o acabamento foi literal), amor e confiança.

A todos vocês, muito obrigado!



Resumo

A água é indispensável para o organismo humano. Como a água pode apresentar determinadas substâncias, elementos químicos e microrganismos que podem ser prejudiciais à saúde do ser humano, a adoção de uma série de etapas para eliminar ou reduzir as concentrações dessas impurezas no seu tratamento torna-se necessária. No entanto, essa atividade industrial gera resíduos que precisam ter uma disposição adequada. Esse é o caso do lodo de estação de tratamento de água, LETA.

O objetivo desta pesquisa foi estabelecer os efeitos da disposição do LETA em uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira) e suas conseqüências no solo, na água superficial e subterrânea. Para tanto, determinou-se a existência, a concentração e a mobilidade dos elementos e compostos químicos de origem antrópica, por meio de estudos mineralógicos, geofísicos e geoquímicos pela comparação do local de disposição do LETA com outras áreas adjacentes, ainda pouco alteradas (*baseline*).

O impacto da disposição final do LETA na cascalheira, situada em Ceilândia, foi avaliado pelo método de resistividade elétrica e por diversas análises físicas, químicas, biológicas e mineralógicas em amostras de solo, do coagulante sulfato de alumínio férrico, do LETA e de águas superficiais e subterrâneas. Para tanto, foram empregadas as técnicas de espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES), espectrofotometria de absorção atômica (AAS) e colorimetria, para determinações de Zn, P, Al, Na, K, Ca, Ti, Ni, Cr, Be, Cu, Y, Ba, V, Sr, La, Ce, Nd, Co, Li, Mn, Cd, Fe, Si, Mg, Pb, Se, Hg, Sb, Ag e As, as cinco últimas apenas na matriz água, além das técnicas analíticas de difratometria de raios-X, gravimetria, granulometria, titulometria, eletroresistividade, condutivimetria, turbidimetria, colimetria, microscopia, entre outras. Os resultados foram tratados estatisticamente para a identificação dos níveis de *baseline* e das possíveis anomalias geoquímicas.

Existe um alto contraste entre os valores de resistividade elétrica medidos no LETA e nas áreas vizinhas (laterita e solo local), que permitiram estabelecer a extensão da área de influência da disposição do lodo químico rico em Al na área de empréstimo, tanto vertical quanto horizontalmente. A caracterização preliminar do lodo disposto na cascalheira mostrou que, ao se desidratar o LETA, formam-se grânulos de difícil separação (granulometria de areia), com redução das concentrações dos elementos de maior mobilidade como Na, Li e Ni, e aumento dos teores de matéria orgânica e dos elementos P, Co, Mn e Fe. A distribuição geoquímica dos elementos em subsuperfície está fortemente associada à variação da composição mineral e granulometria nos perfis de solo. A dispersão geoquímica do LETA foi evidenciada nos primeiros metros da zona não saturada do solo da área de empréstimo. Pela classificação hierárquica é possível notar que a área de disposição do LETA tem se tornado mais semelhante às áreas de cerrado preservado que à cascalheira propriamente dita. A comparação com as áreas de controle apontou diferenças na porção superior do perfil laterítico da área de depósito do LETA, que se devem a presença de matéria orgânica sobre o regolito, ao aumento da capacidade de troca catiônica, à acidez potencial mais elevada e às concentrações mais elevadas de P disponível, P total, Ca trocável, Mn, Mn disponível, Na trocável e Zn disponível, além dos valores anômalos negativos de Al trocável, pH, Pb disponível e Si. Essas diferenças foram consideradas como evidências do caráter não-inerte do lodo, sendo ainda constatadas nos índices de alteração química e no índice de geoacumulação. Do ponto de vista nutricional, o uso do lodo para a recuperação de áreas degradadas torna-se promissor ao se avaliar os teores dos micro e macronutrientes, cujos altos valores são transferidos para os horizontes mais profundos do solo e possibilita o desenvolvimento da vegetação no local. Além disso, a matéria orgânica contribui para a imobilização do Al e Pb, reduzindo a toxicidade



para as plantas. Quanto à composição mineral, os solos da área apresentaram variação do conteúdo de quartzo e de illita correspondente ao próprio litotipo - o metarritmito argiloso (R4) – formado pela intercalação de níveis arenosos e pelíticos. As intensidades dos picos de illita tendem a ser maiores nas amostras referentes aos níveis pelíticos, nos quais o quartzo é constituinte traço ou não foi identificado. Por outro lado, este é o constituinte menor nos níveis arenosos. A goethita corresponde ao nível laterítico formado pelo enriquecimento supergênico em ferro e está presente em toda a área de estudo. A distribuição de gibbsita na área onde houve exploração de laterita (cascalho laterítico) indica proveniência do próprio lodo disposto na cascalheira. Esse mineral pode ser utilizado para rastrear a área de dispersão do LETA. As águas superficiais foram consideradas inadequadas para a avaliação ambiental, devido a contaminação bacteriológica pelo lançamento dos esgotos domésticos e disposição inadequada de resíduos sólidos pela comunidade local. Apesar das águas subterrâneas investigadas serem consideradas fracamente mineralizadas, a infiltração e percolação das águas pluviais através do LETA tem provocado a migração de sólidos dissolvidos totais para o lençol freático, sobretudo nas formas de bicarbonatos e Ca. É possível que esse efeito tenha mobilizado o Pb e provocado o aumento das já elevadas concentrações desse elemento químico nas águas subterrâneas. No entanto, após dez anos de disposição do lodo químico rico em Al na cascalheira, o impacto ambiental nas águas subterrâneas pode ser considerado pequeno, pois no diagrama de *Piper* não foi notada sequer a alteração da classificação dessas águas, que é baseada na sua composição química.

Sendo assim, o LETA pode ser considerado um resíduo não-inerte e compatível com o uso em recuperação de áreas degradadas situadas em regiões com características geológicas e hidroquímicas semelhantes.



Abstract

Water is essential for life. Since water may contain certain substances or microorganisms which can be harmful to human health, it is important to introduce chemical and physical barriers to reduce or eliminate the concentration of noxious elements during the water treatment process. However, such process generates residues which require a proper destination. This is the case of the sludge from the water treatment plant known as LETA.

The aim of present research is to investigate the effects of LETA's disposal in an area damaged by laterite extraction (gravel bed) and its consequences to soil, surface water and groundwater. Therefore, it was intended to determine the existence, concentration and mobility of anthropogenic elements and chemical compounds comparing the area subdued to LETA's disposal and other adjacent regions (still less impacted, as a baseline) using mineralogical, geological and geochemical studies.

The impact of final LETA's disposal in a gravel site located in Ceilandia town was evaluated by using the electric resistivity method complemented by several physical, chemical, biological and mineralogical analyses from soil samples, ferric aluminum sulphate coagulant, LETA, surface water and groundwater. The inductively coupled plasma (ICP/AES), atomic absorption spectrometric (AAS) and colorimetric techniques were used to determine Zn, P, Al, Na, K, Ca, Ti, Ni, Cr, Be, Cu, Y, Ba, V, Sr, La, Ce, Nd, Co, Li, Mn, Cd, Fe, Si, Mg, Pb, Se, Hg, Sb, Ag e As (being the last five only in samples water). Additional analytical methods such as X-ray diffractometry, gravimetry, granulometry, titrimetry, electric resistivity, conductimetry, turbidimetry, microscopy and microbiological, among others, were also used. Results were statistically treated in order to identify baseline levels and possible geochemical anomalies.

There was a clear difference between the values of electric resistivity measured in LETA and in the surrounding area (laterite and soil), which enabled to establish the area under the influence of LETA disposal rich in Al from the lending area, both vertically as horizontally. The preliminary characterization of the sludge disposal in the gravel bed showed that when LETA is dehydrated, there is a formation of a very hard to split sand grains-like form, followed by a decrease in concentration of mobile elements such as Na, Li and Ni, and an increase in concentration of organic matter and elements such P, Co, Mn, and Fe. The geochemical distribution of elements in subsurface was strongly associated to the variation of mineral composition and granulometry in the soils profiles. The LETA geochemical dispersion was evidenced in the first meters of the non saturated zone from the lending area. An hierarchical classification enabled to verify that LETA disposal area has more similarities to local preserved vegetation (Brazilian Cerrado) than to gravel bed area. The comparison to control areas has shown differences in the upper portion of the laterite profile from LETA disposal area, which is explained (1) the presence of organic matter upon regolith, (2) the increase of cationic exchange capability, (3) the higher potential acidity and higher concentrations of available P, Total P, exchangeable Ca, Mn, available Mn, exchangeable Na, and available Zn, in addition to unusual negative values for exchangeable Al, pH, available Pb and Si. These differences were considered as evidence of the noninert characteristic of this material, supporting the same indication from both chemical alteration index and geoaccumulation index. From the nutritional point of view, the use of sludge to recover degraded areas becomes very promising. After analyzing the concentrations of the macro and micronutrients, it was observed that high values of chemical sludge are being transferred to deep soil layers, which enables the development of the local vegetation. Moreover, the organic matter contributes to Al and Pb immobilization, reducing the toxicity to the plants. The mineral composition of the studied soils area showed a variation in the content of quartz and illite on the clay-rich



metarhythmite (R4 – formed by intercalation of sandy and pelitic levels). The intensity of illite peaks tend to be more evident in samples referring to pelitic levels, in which quartz is a trace constituent or not identified. In the other hand, this is the smallest constituent in the sandy levels. The goethite corresponds to lateritic level formed by the supergenic enrichment in Fe and is present all over the study area. The distribution of gibbsite in the area where laterite was exploited (laterite gravel) indicates that it was originated from sludge disposed in the gravel bed. Thus, this mineral can be used to trace the LETA area dispersion. The surface water was not considered suitable for environmental evaluation due to bacteriological contamination from domestic sewage as well as from improper disposal of solid waste by the local community. Although, the groundwater samples analyzed were considered weakly mineralized, infiltration and percolation of runoff waters from LETA are causing migration of dissolved solids to the water table, mainly the bicarbonates forms and Ca. It is possible that this effect had mobilized Pb and promoted a further increase of this element in groundwater. Nevertheless, after following ten years of an Al rich chemical sludge disposal in the gravel bed, there is only a small impact in the groundwater's chemical composition, as Piper diagram did not show any alteration in terms of water classification.

Thus, LETA can be considered a residual that is non inert and compatible to be used in recovery of degraded areas located in regions with similar geological and hydrochemical characteristics.



ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
APRESENTAÇÃO	xvi
CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
Objetivo	3
CAPÍTULO 2	5
Revisão bibliográfica	5
Saneamento e saúde pública	5
Produção do LETA	7
Disposição final do lodo	9
Água, alumínio e meio ambiente	16
Alumínio – importância sanitária	19
CAPÍTULO 3	22
Área de estudo	22
Descrição geral da área	22
Bacia do lago descoberto	24
CAPÍTULO 4	28
Metodologia	28
Coleta de amostras	28
Métodos geofísicos	33
Métodos geoquímicos	38
Difratometria de raios-x	42
Análise dos resultados	43



CAPÍTULO 5	45
 Uso do lodo químico, rico em alumínio, produzido pela estação de tratamento de água rio descoberto para a recuperação de uma área degradada.	45
Abstract	45
Resumo	45
Introdução	46
Descrição geral da área	47
Materiais e métodos	47
Resultados	49
Conclusões	57
Agradecimentos	57
CAPÍTULO 6	60
 Estudo geoquímico da disposição de lodo de eta em área degradada.	60
Abstract	60
Introdução	61
Área de estudo	62
Métodos e técnicas	63
Amostragem	63
Análises químicas	65
Análise mineralógica	66
Análise dos dados	67
Resultados e discussão	68
Conclusões	79
Agradecimentos	80
CAPÍTULO 7	81
 Levantamento geofísico e mobilização de elementos e compostos químicos em área degradada utilizada para a disposição de lodo de estação de tratamento de água.	81
Introdução	81
Parte Experimental	85



Área de estudo	85
Coleta de amostras	87
Análise da água	87
Métodos geofísicos	88
Métodos geoquímicos	90
Análise dos resultados	91
Resultados e discussão	93
Conclusões	103
Agradecimentos	104
CAPÍTULO 8	105
Conclusões	105
CAPÍTULO 9	108
Bibliografia	108
ANEXOS	114



ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 – Detalhe das gretas de contração do lodo químico disposto na cascalheira.	8
2.2 – Etapas do tratamento da água pelo processo de tratamento convencional, incluindo as etapas do tratamento de resíduos sólidos. FONTE: Silva (2003).	13
2.3 – Análise parasitológica em amostras compostas do lodo da ETA-RD. Resultados médios de duplicatas para a pesquisa e estudo da viabilidade de ovos de helmintos.	19
3.1 – Área de estudo. Destaque para a localização dos poços de monitoramento (P1, P2, P3, P4 e P5) e das drenagens (D1, D2 e D3). Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator-UTM / SICAD).	23
4.1 – Localização da área de estudo. Em destaque a área da cascalheira (–), a malha de resistividade (...) e os pontos de sondagem (●). Coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), datum Astro Chuá.	29
4.2 – Sondagem Mista (rotativa e percussão) realizada na área de disposição do lodo da ETA-RD na cascalheira (Ponto S1).	29
4.3 – Instalação dos poços de monitoramento na área de estudo por sondagem por percussão com jato d'água. A) Equipamento utilizado nas sondagens; B) Detalhe interno do poço de investigação (chave, tubo de aço de 6", tubo geomecânico vedado com rolha de silicone inerte, cadeado e tampa rosqueável); C) Poço instalado.	32
4.4 – Projeto do poço de investigação gentilmente cedido pelo Professor José Elói Guimarães Campos.	32
4.5 – Localização dos pontos e resultado das sondagens elétricas verticais no levantamento realizado pela turma de Graduação em Geologia da UnB.	36
4.6 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo e dos ensaios geofísicos na cascalheira. Na foto, em destaque, a disposição dos eletrodos no arranjo de <i>Wenner</i> . Datum: Astro Chuá.	37
4.7 – Detalhe do equipamento usado para o ensaio geofísico, utilizando-se o arranjo de <i>Schlumberger</i> .	37
4.8 – Caracterização preliminar do lodo de estação de tratamento de água disposto na cascalheira. Pontos 1 e 2: lodos recentemente depositados na cascalheira; Ponto 3: lodo desidratado; Ponto 4: lodo desidratado antigo, misturado ao laterito e Ponto 5: material carregado pela chuva.	40



5.1 – Levantamento geofísico na cascalheira. A mancha escura central corresponde à pluma de lodo químico na área de estudo.	50
5.2 – Dendogramas correspondentes à classificação hierárquica dos pontos de sondagem S1, S2 e S3.	51
5.3 – Difratoograma de Raios-X para amostra S1 – 1 metro. Notar a presença de gibbsita.	53
5.4 – Difratoograma de Raios-X para amostra S2 – 1 metro. Notar a presença de gibbsita.	53
5.5 – Difratoograma de Raios-X para amostra S3 – 1 metro. Notar a ausência de gibbsita.	54
5.6 – Difratoograma de raios-X para amostra de lodo da ETA Rio Descoberto. Notar os picos representando a gibbsita.	54
5.7 – Fotos de carapaças de fitoplâncton presentes no lodo da ETA Rio Descoberto. (a) <i>Tetraedron sp</i> ; (b) <i>Cyclotella sp</i> ; (c) <i>Pinnularia sp</i> ; (d) <i>Synedra sp</i> ; (e) <i>Coelastrum sp</i> , além de um exemplar ainda preservado de alga verde (f) <i>Glotila filamentosa</i> . Escala: barra igual a 25µm.	55
5.8 – Vegetação desenvolvendo-se no lodo químico.	56
6.1 – Localização da área de estudo. Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator / SICAD).	63
6.2 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na cascalheira. Os círculos pretos mostram as principais áreas de disposição do LETA. Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator – UTM / SICAD).	66
6.3 – Dendograma gerado a partir da Classificação Hierárquica dos pontos de coleta na área de estudo.	70
6.4 – Localização espacial dos grupos estabelecidos na Classificação Hierárquica.	70
6.5 – Dispersão dos analitos na área de estudo. As anomalias são mostradas nas legendas com a cor sólida preta (anomalia positiva). Em vermelho a área de disposição do LETA. Nenhuma legenda foi atribuída aos valores situados no intervalo: média \pm 1 desvio-padrão. As partes brancas com bolas pretas para os valores obtidos para o intervalo em que a média era somada a 1 e 2 desvios e as linhas verticais pretas quando a média era subtraída de 1 a 2 vezes o desvio-padrão. As únicas figuras que não seguiram essa legenda foram as do pH e do Pb, onde se optou por uma outra escala, dada a sua criticidade à mobilização do Al e/ou toxicidade para as plantas.	73
6.6 – Abundância dos elementos na área de disposição do LETA.	74
6.7 – Diagramas de Piper referentes aos poços de investigação (a) e drenagens na área de	75



estudo (b).

- 6.8 – Variação dos níveis da água medidos nos poços de monitoramento. 76
- 6.9 – Variação mensal das concentrações de SDT dos poços de monitoramento. 76
- 6.10 – Classificação Hierárquica dos pontos de coleta de água. 77
- 6.11 – Classificação Hierárquica dos resultados das análises de água. 77
- 7.1 – Localização dos pontos de ensaios geofísicos na cascalheira. Datum: Astro Chuá. 89
- 7.2 – Levantamentos geofísicos na cascalheira. As manchas centrais correspondem à pluma de lodo químico na área de estudo. (a) Mapeamento horizontal, os destaques em branco correspondem aos pontos de coleta localizados na área de disposição do LETA; (b) Sondagens elétricas verticais, destaque para a área entre 150 e 300 metros, onde há a disposição do lodo. As escalas gráficas são diferentes em virtude das diferentes épocas em que os dados foram obtidos. 93
- 7.3 – Perfis verticais de vários parâmetros analisados nas amostras obtidas na perfuração dos poços de monitoramento. As faixas que aparecem em destaque em cada um dos gráficos correspondem aos níveis de base (intervalo de dois desvios-padrão em relação ao valor médio das amostras da área de controle – Poço de monitoramento à montante). (a) Resultados de acidez potencial, CTC, pH, matéria orgânica, $Al_{\text{trocável}}$ e $Pb_{\text{disponível}}$; (b) Resultados de Mn, $Mn_{\text{disponível}}$, $Zn_{\text{disponível}}$, $P_{\text{disponível}}$, $Na_{\text{trocável}}$ e $Ca_{\text{trocável}}$. 96
- 7.4 – Classificação hierárquica das amostras extraídas na perfuração dos poços de monitoramento. As análises dos elementos majoritários, a maior parte na forma de óxidos, foram colocadas em paralelo para indicar os horizontes diagnósticos. (a) Poço LETA, (b) Poço à montante e (c) Poço à jusante. 99
- 7.5 – Variação dos níveis da água medidos nos poços de monitoramento. 100
- 7.6 – Variação mensal das concentrações de SDT dos poços de monitoramento. 101
- 7.7 – Diagramas de *Piper* referentes às amostras de água dos poços de investigação. 101



ÍNDICE DE TABELAS

2.1 – Quantificação multitemporal das áreas de cobertura vegetal e uso do solo (em ha). FONTE: SEBRAE (2004).	6
2.2 – Produção de LETA – Rio Descoberto (em toneladas). Os valores foram expressos em base úmida, ou seja, cerca de 70% desses valores referem-se à água contida no lodo.	7
2.3 – Concentrações elementares (mg.kg^{-1}) para lodos químicos ricos em Al de diferentes estações de tratamento de água, para sedimentos da bacia do Descoberto e para valores típicos de solo.	15
2.4 – Doenças relacionadas à água.	18
4.1 – Localização dos poços de monitoramento. Datum: Astro Chuá.	31
5.1 – Resultados das análises químicas nas amostras de solo e lodo químico, bem como do Índice de Alteração Química (IAQ). Pela Topocart (2004), C corresponde a silte p/ argiloso e S a silte p/ arenoso. Os resultados correspondem as massas secas das amostras.	58
5.2 – Resultados das análises de elementos químicos nas amostras de solo, lodo químico e coagulante. Os resultados estão expressos em partes por milhão, ppm, para as massas secas das amostras.	59
6.1 – Resultados das análises do solo, coletadas em malha regular 6x9 em junho de 2006, distribuídos no Grupo 1 (solo de cerrado), Grupo 2 (área de disposição do LETA), Grupo 3 (cascalheira isenta de LETA) e Grupo 4 (uso antrópico e áreas limítrofes). Foram adicionados os limites de detecção obtidos.	68
6.2 – Elementos químicos disponíveis no solo, lodo e coagulante.	69
6.3 – Resultados das análises de água.	75
7.1 – Poços de monitoramento localizados à montante (P Montante), à jusante (P Jusante) e na área de disposição do LETA (P LETA). Datum: Astro Chuá.	87
7.2 – Resultados das análises químicas das amostras retiradas a cada três metros na perfuração dos poços.	95
7.3 – Classificação dos parâmetros pelo índice de geoacumulação, conforme o grau de poluição.	98
7.4 – Índices de Geoacumulação obtidos nas amostras de solo do poço LETA.	98
7.5 – Resultados das análises de água.	102



APRESENTAÇÃO

São nove os capítulos que compõem a tese. O primeiro capítulo é composto pela Introdução e Objetivos da pesquisa. O segundo capítulo é intitulado Revisão Bibliográfica e traz o estágio atual do conhecimento sobre o tema proposto, incluindo aspectos relacionados à saúde pública, produção do lodo de estação de tratamento de água no Brasil e na ETA Rio Descoberto, alternativas para a disposição e aproveitamento do lodo, assim como temas relacionados ao saneamento e preservação ambiental. O terceiro capítulo é composto pela descrição da área de estudo, contemplando o contexto geológico, o clima, o relevo e a vegetação. Ainda no capítulo 3, outros temas referentes à bacia do Lago Descoberto são levantados, tendo em vista que os sólidos em suspensão nas águas desse Lago estão sendo removidos na ETA-RD para gerar o lodo químico. No capítulo 4 há a descrição das metodologias utilizadas para a coleta de amostras de solo, de coagulante, do lodo e das águas superficiais e subterrâneas. Neste capítulo são abordados temas referentes aos métodos geofísicos e geoquímicos utilizados na análise ambiental, além dos estudos preliminares, das metodologias de análises para determinação da composição mineral de algumas amostras e quais as ferramentas utilizadas para a avaliação dos resultados. Nos capítulos 5 a 7 estão os artigos produzidos e pertinentes a pesquisa. Há um artigo publicado, um submetido e outro a ser submetido. O capítulo 5 traz o artigo publicado na Revista Geochimica Brasiliensis. Para a elaboração desse artigo foram realizados levantamentos geofísicos em 60 pontos distintos e analisadas amostras de lodo químico, coagulante utilizado no tratamento da água, além de 30 amostras obtidas em 3 sondagens, que exploraram a zona não saturada do solo da área de estudo. O capítulo 6 mostra o artigo submetido à Revista Química Nova e nele são abordados temas referentes à química e composição mineral dos solos, composição do lodo de ETA e do coagulante, além das avaliações da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. O capítulo 7 resgata o levantamento geofísico realizado com o uso do arranjo de Wenner e o compara as sondagens elétricas verticais. Neste capítulo, a exploração do subsolo avançou à zona saturada e relacionou à química do solo com a hidrogeoquímica. Finalizando, os capítulos 8 e 9 trazem as conclusões e fontes consultadas. Há ainda a parte de anexos que contempla os resultados gerados no trabalho.

Ricardo Moreira



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas estações de tratamento de água, ETA, a coagulação visa principalmente à retirada do material em suspensão. Este processo é habitualmente realizado por meio da adição de sais de ferro ou de alumínio, ou de polímeros sintéticos (Pavanelli, 2001). A coagulação é resultado da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização de cargas; varredura; adsorção e formação de pontes interpartículas (Parsekian, 1998; Gonçalves *et al*, 1997). Álvares relata que na Estação de Tratamento de Água Rio Descoberto, ETA-RD, o mecanismo de coagulação é o de adsorção das espécies hidrolizadas na superfície dos colóides e neutralização dessas cargas negativas que ocorre sob dosagens e pH específicos (informação verbal, 2006). Em geral, esses mecanismos atuam objetivando agregar as partículas, tornando-as maiores e com maior peso específico, de modo a facilitar a sua remoção da massa líquida.

Dentre os coagulantes utilizados no tratamento das águas dos mananciais do Distrito Federal destacam-se o hidroxiclreto de alumínio e o sulfato de alumínio férrico.

O lodo químico produzido pelas Estações de Tratamento de Água, LETA, é um resíduo gerado no processo de tratamento da água, principalmente nas etapas de decantação e lavagem dos filtros. Trata-se de um material extremamente gelatinoso, composto por hidróxidos de alumínio, partículas inorgânicas como argila e silte, colóides de cor e microrganismos, incluindo plâncton, além de outros materiais orgânicos e inorgânicos, que são removidos da água tratada, ou ainda provenientes dos produtos químicos adicionados ao processo (Andreoli, 2001; Moreira *et al*, 2007). Seu pH varia de 5 a 7, sendo insolúvel na faixa natural de pH da água.

O lodo químico produzido neste processo é um subproduto que não tem recebido, no Brasil, maiores cuidados com relação ao tratamento adequado para descarte (Bidone *et al.*, 1997; Di Bernardo *et al.*, 1999; Parsekian, 1998), sendo comum a sua disposição diretamente nos rios, lagos e reservatórios.

Estima-se que no Brasil sejam despejadas 2.000 toneladas/dia de LETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento (Cordeiro, 1999). Essa prática pode contribuir para o



consumo de oxigênio dissolvido no curso d'água, levando a condições anaeróbias, com produção de odores, crescimento excessivo de algas e mortandade de peixes (Machado *et al*, 2005). Alguns estudos mostraram a toxicidade crônica desse material para os organismos aquáticos, assim como a degradação da qualidade da água e dos sedimentos (Barbosa *et al*, 2000; Sotero-Santos *et al*, 2005).

No entanto, dada a crescente preocupação com os aspectos negativos que a disposição inadequada do LETA possa trazer ao meio ambiente, outras práticas têm sido adotadas. Dentre elas, a utilização como insumo agrícola (Machado *et al*, 2005; Hyde & Morris, 2000), a recuperação de áreas degradadas (Moreira *et al*, 2007, Machado *et al*, 2005; Lenzi *et al*, 2005; Teixeira *et al*, 2005; Moreira *et al*, 2003), a co-disposição em aterros sanitários (Andreoli, 2001, Di Bernardo *et al*, 2002; Guerra & Angelis, 2005), a reciclagem de resíduos da construção civil (Hoppen *et al*, 2005), o uso como coagulante para estações de tratamento de esgotos (Silva, 2003), a regeneração do coagulante (Gonçalves *et al*, 1999), entre outras.

Além do material coagulado, os filtros da ETA retêm também matéria orgânica. Esta, por sua vez, é constituída por plâncton, bem como por materiais particulados provenientes do solo carregado pela chuva como, por exemplo, excreta, restos vegetais e sementes.

Bidone *et al* (1997) sugerem que o Al presente em altas concentrações no lodo químico pode ser imobilizado pela componente orgânica, que o adsorve formando complexos estáveis, pouco ou não solúveis.

Estudos anteriores do lodo da ETA-RD mostraram baixos valores de saturação de Al, que sugerem a não toxicidade deste elemento. O seu baixo valor nutricional inviabiliza o seu uso na agricultura. No entanto, a sua aplicação para a recuperação de áreas degradadas pode ser considerada viável (Moreira *et al.*, 2003). Para a disposição do lodo, foi então escolhida uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira), onde o solo havia sido retirado, impossibilitando a fixação de vegetação.

As características do LETA o tornam mais parecido com o solo que os lodos de esgotos (AWWA, 1995). Neste caso, o nitrogênio e a matéria orgânica contida no LETA são, em geral, mais estáveis, menos reativos e estão em menores concentrações.

Na Estação de Tratamento da Água Rio Descoberto, desde março de 1997, o lodo proveniente da lavagem dos filtros é centrifugado e encaminhado para a cascalheira desativada para ser utilizado na recuperação daquela área degradada (Barbosa, 1997). A ETA-RD tem capacidade nominal para 6.000 L/s, utiliza o coagulante sulfato de alumínio férrico no tratamento da água do



Lago Descoberto e trabalha com um alto índice de automatização dos seus processos. A produção anual de LETA desta estação ultrapassa 2.000 toneladas.

O uso de cascalheiras para a disposição final do lodo é uma prática adotada no Distrito Federal, mas ainda são poucos os estudos que atestem sobre os riscos que os componentes desse material possam trazer a essas áreas mineradas.

O LETA desidratado, pelas altas concentrações de alumínio que apresenta, necessita de maiores estudos que atestem o seu comportamento no meio ambiente, posto que, sob condições de baixo pH, é possível que haja solubilização desse material, provocando impactos indesejáveis ao meio ambiente.

O LETA é um resíduo sólido e, como tal, sujeito a classificação de resíduos sólidos, conforme ABNT NBR 10.004/2004, antes de qualquer destinação ou utilização. No entanto, a disposição como substrato para a recuperação de área degradada já está sendo efetuada desde 1997. Por esse motivo, é fundamental a execução de estudos suplementares que visem conhecer o comportamento do lodo no solo e sua influência ou não para a contaminação do lençol freático da região da cascalheira.

OBJETIVOS

Nesta pesquisa procurou-se estabelecer os efeitos da disposição do LETA em uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira) e suas conseqüências no solo, na água superficial e subterrânea. Para tanto, determinou-se a existência, a concentração e a mobilidade dos elementos e compostos químicos de origem antrópica, por meio de estudos mineralógicos, geofísicos e geoquímicos pela comparação do local de disposição do LETA com outras áreas adjacentes, ainda pouco alteradas (*baseline*).

A água subterrânea representa um dos bens mais sensíveis e, ao mesmo tempo, importantes como meio de propagação de plumas de contaminantes. Por isso a preocupação em testar, por meio de ensaios e conceitos de geoquímica ambiental, a hipótese de que a infiltração e a percolação das águas pluviais através do lodo disposto na área degradada podem ou não provocar a migração de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos para a zona não saturada. Alguns desses compostos podem ainda atingir a zona saturada e, portanto, alterar a composição das águas do



aqüífero. Para tanto, além da avaliação da qualidade das águas subterrâneas, foi monitorada a variação do nível freático e determinado a dinâmica dos fluxos na área de estudo.

Os objetivos secundários foram a avaliação das reações químicas e a especiação do Al nas águas tratadas da ETA-RD, por meio de metodologias de análise e informações sobre a toxicidade das diversas formas de Al no meio aquático, bem como a possibilidade de se estabelecer um procedimento para a avaliação ambiental da disposição de resíduos sólidos com características similares ao LETA, em áreas degradadas ou aterros. Esse procedimento poderia ser aplicado, por exemplo, na futura estação que tratará a água do Corumbá ou na já operacional ETA Pipiripau.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

SANEAMENTO E SAÚDE PÚBLICA



Durante séculos a água foi considerada um bem público de quantidade infinita e à disposição do homem por se tratar de um recurso natural auto-sustentável devido a sua capacidade de autodepuração. Porém, o crescimento das cidades aumentou de tal forma a quantidade de esgotos lançados nos córregos, nos rios, nas represas e nos lagos próximos às aglomerações, que a capacidade de autodepuração desses corpos receptores foi superada pela carga poluidora dos efluentes (Philippi Jr & Malheiros, 2005).

Hoje se estima que um terço da população da Terra viva em áreas com escassez de água por causa da degradação ou por se tratar de regiões áridas e semi-áridas, como as regiões metropolitanas e as áreas ao norte da África e do Oriente Médio, respectivamente. A alta densidade demográfica desses locais agrava a situação; estima-se que em 2025 dois terços da população do planeta vão habitar essas regiões (ONU 1998 *apud*, Philippi Jr & Malheiros, 2005).

A escassez e a poluição dos recursos hídricos têm conseqüências sociais, econômicas e ambientais, uma vez que:

- Comprometem o equilíbrio dos ecossistemas, dificultando a conservação da flora e da fauna e a diluição de efluentes;
- Provocam doenças por causa da má qualidade ou pela falta de água em quantidade suficiente para as necessidades mínimas;
- Impedem o desenvolvimento socioeconômico, ao prejudicar as atividades de recreação e pesca e as propostas paisagísticas; o desenvolvimento industrial, ao dificultar a geração de energia elétrica, refrigeração de máquinas, produção de



alimentos, navegação e turismo; e o desenvolvimento da agricultura, ao afetar a produção de cereais, frutas e hortaliças.

Essas situações têm provocado conflitos regionais, como os ocorridos entre Turquia e Iraque pelas águas do Rio Eufrates; entre Síria, Israel e Jordânia pelas águas do Rio Jordão e mananciais das colinas de Golã; entre Brasil, Argentina e Paraguai pelas águas do Rio Paraná, para a geração de energia elétrica.

A quantidade total de água do planeta Terra é constante, variando apenas de estado físico e a forma como é encontrada na natureza. Cerca de 75% da superfície do planeta é constituída de água. Dessa proporção 97% é salgada e está situada nos oceanos e mares. Outros 2,7% estão na forma de geleiras, de neve, de vapores atmosféricos e em profundidades inacessíveis, restando 0,3% disponível para o aproveitamento.

As modificações ambientais decorrentes do processo antrópico de ocupação dos espaços e de urbanização, que ocorrem em escala global, em especial as que acontecem desde os séculos XIX e XX, impõem taxas incompatíveis com a capacidade suporte dos ecossistemas naturais. Nesse contexto, os mananciais superficiais têm sido cada vez mais castigados com lançamentos de despejos diversos, decorrentes do crescimento populacional e da ocupação desordenada das áreas de proteção.

No Distrito Federal, o mapeamento multitemporal realizado pela UNESCO em 2000, revela um processo de uso e ocupação da terra no qual sucessivamente vão desaparecendo os espaços naturais e surgindo áreas urbanas e/ou espaços agrícolas. Na tabela 2.1 pode-se verificar a dinâmica da alteração da cobertura vegetal e do uso do solo do Distrito Federal entre 1954 e 1998 (SEBRAE, 2004).

Tabela 2.1 – Quantificação multitemporal das áreas de cobertura vegetal e uso do solo (em ha). FONTE: SEBRAE (2004).

Classe de Legenda	1954	1964	1973	1984	1994	1998
Mata	109.414	94.533	88.017	73.060	69.416	57.770
Cerrado	220.003	198.694	176.103	105.281	100.541	57.622
Campo	251.609	275.267	254.597	222.187	144.762	130.501
Corpos d'água	160	4.074	4.749	5.750	5.909	5.369
Área agrícola	93	2.570	35.223	120.954	213.896	269.366
Área urbana	121	4.625	12.208	21.409	28.134	38.179
Reflorestamento	0	0	0	19.357	11.977	9.236
Solo Exposto	0	1.637	10.503	13.402	6.765	13.357
TOTAL	581.400	581.400	581.400	581.400	581.400	581.400

PRODUÇÃO DO LETA



Assim a qualidade da água piora, e para tornar-lá potável exige-se que maiores quantidades de produtos químicos sejam aplicadas no tratamento. Como consequência, observa-se o acréscimo na geração de rejeitos nas ETAs, onde podem ser citados: lodos gerados em decantadores e água de lavagem dos filtros.

Em escala global se estima que 10.000 toneladas de lodos (base seca) são geradas todos os dias nos processos de tratamento de água (Waite & Dharmapha, 1993 *apud* Reinhart *et al*, 2003).

No Brasil existem cerca de 7500 ETAs, chamadas convencionais ou tradicionais, que empregam a coagulação / floculação / sedimentação e filtração. Esses sistemas geram rejeitos nos decantadores e nos filtros e, na grande maioria dos casos, os lança diretamente em cursos d'água, agravando a questão ambiental.

No Distrito Federal, mais especificamente na ETA-RD, o histórico da produção de lodo é mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Produção de LETA – Rio Descoberto (em toneladas). Os valores foram expressos em base úmida, ou seja, cerca de 70% desses valores referem-se à água contida no lodo. FONTE: CAESB.

MESES	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
JANEIRO	0	165	275	192,5	236,5	176	192,5	308	380	176	220
FEVEREIRO	0	126,5	214,5	159,5	214,5	242	225,5	308	127	165	209
MARÇO	55	330	308	214,5	198	176	181,5	390,5	187	160	0
ABRIL	44	346,5	313,5	137,5	198	176	280,5	363	138	324,5	110
MAIO	198	282	154	170,5	110	192,5	187	313	187	181,5	225,5
JUNHO	148,5	110	82,5	110	99	165	165	324,5	149	88	181,5
JULHO	137,5	198	115,5	99	45,9	115,5	165	198	204	132	132
AGOSTO	22	236,5	71,5	60,5	44	110	165	159,5	187	137,5	154
SETEMBRO	115,5	42,9	88	99	99	197,5	110	143	149	82,5	93,5
OUTUBRO	38,5	275	198	60,5	49,5	154	176	121	187	126,5	154
NOVEMBRO	88	253	132	187	49,5	148,5	170,5	93,5	226	148,5	154
DEZEMBRO	269,5	275	270	203,5	110	126,5	187	126,5	281	88	187
TOTAL	1116,5	2640,4	2222,5	1694	1453,9	1979,5	2205,5	2848,5	2402	1810	1820,5
MÉDIA	2017,6 ton/ano										

O LETA é material extremamente gelatinoso e tão compressível que resiste à passagem de água através dele, devido à estrutura de formação dos flocos durante o processo de coagulação-floculação (Albrecht, 1972 *apud* Andreoli, 2001).

As partículas presentes na água a ser tratada são basicamente colóides que conferem à mesma cor e turbidez (colóides de $1\mu\text{m}$ a 1mm). Isso dificulta a remoção de água livre dos lodos. Entenda-se água livre como sendo a parcela de água que se move livremente por gravidade. Essa água pode ser removida com relativa facilidade por meio de sistemas mecânicos ou, naturalmente, por drenabilidade como ocorre na cascalheira.

A rápida sedimentação das partículas, que passam a ocupar os vazios da massa sólida, dificulta a passagem da água livre. Assim, se isso ocorrer, o gradiente de passagem de água através das partículas de lodo e do meio filtrante diminui, elevando o tempo de drenagem. O tempo de drenagem da água é um dos principais fatores a serem atingidos na operação de remoção da água, pois assim as etapas posteriores são facilitadas. A rápida remoção dessa permite que a massa sólida inicie sua retração, formando sulcos profundos que possibilitam a passagem de água de chuva durante precipitações (figura 2.1).



Figura 2.1 – Detalhe das gretas de contração do lodo químico disposto na cascalheira.

DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO



A disposição final desses resíduos tem gerado muita preocupação. Dentre as principais práticas de destinação do lodo temos:

- a) Descarga em cursos d'água: Machado *et al.* (2005) alertam para a contaminação orgânica gerada pelo lodo, que pode contribuir para o consumo de oxigênio dissolvido no curso d'água, levando a condições anaeróbias, com produção de odores, crescimento excessivo de algas e mortandade de peixes. Alguns estudos mostraram a toxicidade crônica desse material para os organismos aquáticos, assim como a degradação da qualidade da água e dos sedimentos (Barbosa *et al.*, 2000; Sotero-Santos *et al.*, 2005).
- b) Insumo agrícola: segundo Richter (2001 *apud* Machado *et al.* 2005), 25% dos resíduos gerados pelas ETAs nos EUA são aplicados em solos agrícolas. As principais vantagens são: agregação de estrutura nos solos, o ajuste do pH, o aumento do número de poros e conseqüentemente da capacidade de retenção de água e a aeração do solo. As desvantagens são: a) a possibilidade do aumento da concentração de metais pesados no solo e na água subterrânea, b) a adsorção do fósforo do solo pelos hidróxidos de alumínio e ferro, que afeta o crescimento de plantas e microrganismos, e provoca o decréscimo na produtividade do solo. Machado *et al.* (2005) realizaram estudos que atestam o uso dos resíduos de uma ETA em atividades agrícolas, por conterem macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento de plantas e vegetais em quantidades superiores aos encontrados em solos da região, não sendo verificadas concentrações de metais que possam ocasionar problemas de contaminação. Hyde & Morris (2000) utilizaram o lodo de ETA rico em Al na proporção de 100g/kg em solo contendo P disponível acima das concentrações consideradas ótimas e conseguiram reduzir de 30 a 60% esses teores, sem afetar o bom crescimento das plantas, nem tampouco provocar efeitos deletérios ao solo como alterações inaceitáveis do pH, salinidade, Al disponível e metais pesados. O benefício em se reduzir os níveis de P disponível nos solos está relacionado ao carreamento deste elemento químico pela chuva aos rios e lagos causando eutrofização.

- c) Recuperação de áreas degradadas: no Distrito Federal, as atividades para extração de areia, cascalho, argila e saibro são responsáveis pela quase totalidade das áreas degradadas (SEBRAE, 2004). Esse tipo de mineração caracteriza-se pelo baixo investimento, pela ausência de aporte de tecnologia nas fases de produção, controle ambiental e recuperação das áreas mineradas. Devido às características do lodo químico, a utilização em áreas degradadas ou em parques florestais pode trazer benefícios para o solo (Machado *et al.*, 2005). Moreira *et al.* (2007) estudaram a influência da disposição do LETA em uma cascalheira. Para tanto, analisaram os minerais e a composição das amostras colhidas em sondagens, além de empregarem técnicas de prospecção geofísica na área. Os resultados mostraram que a distribuição dos elementos em subsuperfície estava fortemente associada a composição mineral e a granulometria nos perfis de solo. Os nutrientes estavam sendo transferidos para os horizontes mais profundos do solo e permitiram a fixação de vegetação no local. Estes fatos foram considerados positivos para o uso desse material na recuperação daquela área degradada. Lenzi *et al.* (2005) também identificaram aplicações do lodo na recuperação do solo, desde que sejam tomados os mesmos cuidados que os admitidos para os lodos das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Moreira *et al.* (2003) caracterizaram o lodo da Estação de Tratamento da Água Rio Descoberto e encontraram valores elevados dos micronutrientes Zn, Fe, Mn e Cu, além de matéria orgânica. A acidez potencial foi considerada elevada e propícia ao LETA maiores condições a este material para a retenção dos ânions. No entanto, a baixa CTC efetiva indicou que o material pode liberar cátions para a coluna d'água. Estes resultados, aliados à deficiência em Ca^{2+} , K^{+} e P, inviabilizam o uso do LETA como aditivo agrícola, mas propício à recuperação de áreas degradadas.
- d) Co-disposição em aterros sanitários: fundamentada na possibilidade de atenuação de metais e componentes tóxicos ou perigosos, geralmente oriundos de resíduos industriais, pelos resíduos urbanos de natureza predominantemente orgânica, a co-disposição em aterros sanitários deve ser precedida da desidratação do lodo químico, já que o excesso de água pode acentuar a acidogênese em detrimento da metanogênese (Bidone *et al. in* Andreoli, 2001). A produção de ácidos voláteis em aterros sanitários abaixa o pH do meio para faixas de 5 a 5,5 e permite a dissolução de Al e outros metais (Di Bernardo *et al.*, 2002). No entanto, Guerra & Angelis (2005) estudaram não a co-disposição do lodo com o resíduo sólido, mas sim com o solo utilizado na cobertura das células do aterro sanitário de Rio



Claro-SP e concluíram que essa prática não influenciou de forma negativa o processo de biodegradação da matéria orgânica presente, indicando a viabilidade da disposição final do lodo em aterro sanitário.

- e) Reciclagem de resíduos da construção civil: a imobilização do lodo da ETA em matrizes de argamassa e concreto, em conjunto com agregados reciclados de entulho, pode ser viável em diversas aplicações na construção civil, conforme denotam os resultados obtidos por Sales & Cordeiro (*in* Andreoli, 2001). Nesse estudo, a proporção de 3% de adição de lodo em relação ao agregado miúdo foi o que proporcionou a obtenção de melhores características mecânicas. Esta mistura pode ser utilizada na fabricação de artefatos, estruturas pré-moldadas e construção de pavimentos em concreto. Hoppen *et al.* (2005) empregaram, nos concretos, misturas de lodo nas proporções de 3, 5, 7 e 10% em substituição à areia e constataram que para misturas de até 5% de lodo, com maior resistência a compressão, é possível fabricar artefatos e blocos, além de construir pavimentos em concreto de cimento PORTLAND (pavimentos rígidos). Misturas superiores a 5%, no entanto, devem ter seu uso mais restrito como em calçadas, blocos e placas de vedação, peças decorativas, contrapisos e pavimentos residenciais. No entanto, Tsutyia *et al.* (2001 *apud* Sabogal-Paz & Di Bernardo, 2005) alertam para o fato de que a presença de carvão ativado e/ou cal no lodo inviabiliza seu uso na fabricação de tijolos, por causar expansão e, conseqüentemente, rachaduras; porém esses lodos podem ser utilizados na recuperação de solos com acidez alta.
- f) Coagulante para estações de tratamento de esgotos: Silva (2003) realizou estudos sobre a viabilidade técnica do uso de resíduo sólido acidificado proveniente do sistema de tratamento de água, popularmente chamado lodo de ETA, como coagulante para o processo de polimento final de efluentes secundários de estações de tratamento biológico de esgotos. Nesse estudo ficou comprovada a eficiência desse resíduo acidificado para a remoção de fósforo e de algas similares às obtidas com o uso de sulfato de alumínio. Além das evidentes vantagens econômicas e ambientais, foi notado que o lodo gerado nos processos de sedimentação e de flotação com o uso de LETA acidificado mostrou-se menos volumoso e mais denso que no caso do uso de coagulante sulfato de alumínio. Essa característica pode reduzir o consumo de polímeros na etapa de condicionamento e aumento da concentração de sólidos no lodo desidratado, que são aspectos positivos no processo de desidratação do lodo gerado.



- g) Regeneração do coagulante: Gonçalves *et al* (1997, *apud* Sabogal-Paz & Di Bernardo, 2005) constataram que tanto as reações dos ácidos ($2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) quanto das bases ($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3 + \text{NaOH} \rightarrow \text{Al}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_4^- + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+$) com a fração do lodo sob a forma de hidróxido de alumínio tri-hidratado eram capazes de regenerar o coagulante. Essas reações ocorrem com o lodo gerado a partir da coagulação da água bruta no mecanismo de varredura, uma vez que as frações de Al presentes no lodo obtido sob outras formas (hidroxocomplexos adsorvidos em colóides inorgânicos e Al presentes na estrutura dos materiais argilosos e silicosos contidos na água), dificilmente serão solubilizados nas condições geralmente utilizadas na regeneração de coagulantes. Em pesquisa posterior, Gonçalves *et al* (1999, *apud* Sabogal-Paz & Di Bernardo, 2005) verificaram que os lodos gerados a partir do mecanismo de varredura apresentaram percentual de regeneração superior aos lodos gerados por mecanismo de neutralização de cargas, reafirmando a importância do mecanismo de coagulação para a reutilização de coagulantes químicos.

A produção do lodo da Estação de Tratamento de Água Rio Descoberto e a sua disposição final se faz por meio do processo descrito na Figura 2.2. A água de lavagem dos filtros é encaminhada a um tanque de acumulação dotado de agitadores para evitar a precipitação de sólidos. Destes tanques, a água de lavagem é bombeada para dois adensadores. O sobrenadante desses adensadores é encaminhado a dois tanques de equalização e posteriormente retorna à caixa de chegada da ETA-RD para seu reaproveitamento. O lodo adensado é encaminhado a dois tanques-pulmões e em seguida são bombeados para dois decantadores centrífugos. Na linha de alimentação das centrífugas é realizada a aplicação de um polímero. O efluente clarificado pode ser bombeado para os adensadores ou descartado para a rede de águas pluviais. O lodo centrifugado é encaminhado para caçambas, com capacidade de seis toneladas, sendo em seguida conduzido para a cascalheira desativada, para ser utilizado na recuperação daquela área degradada. Em caso de excesso de produção o lodo é disposto em uma lagoa na ETA, usada como alternativa (Barbosa, 1997). Vale destacar que a Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto tem capacidade nominal para 6.000 L/s e trabalha com um alto índice de automatização dos seus processos.

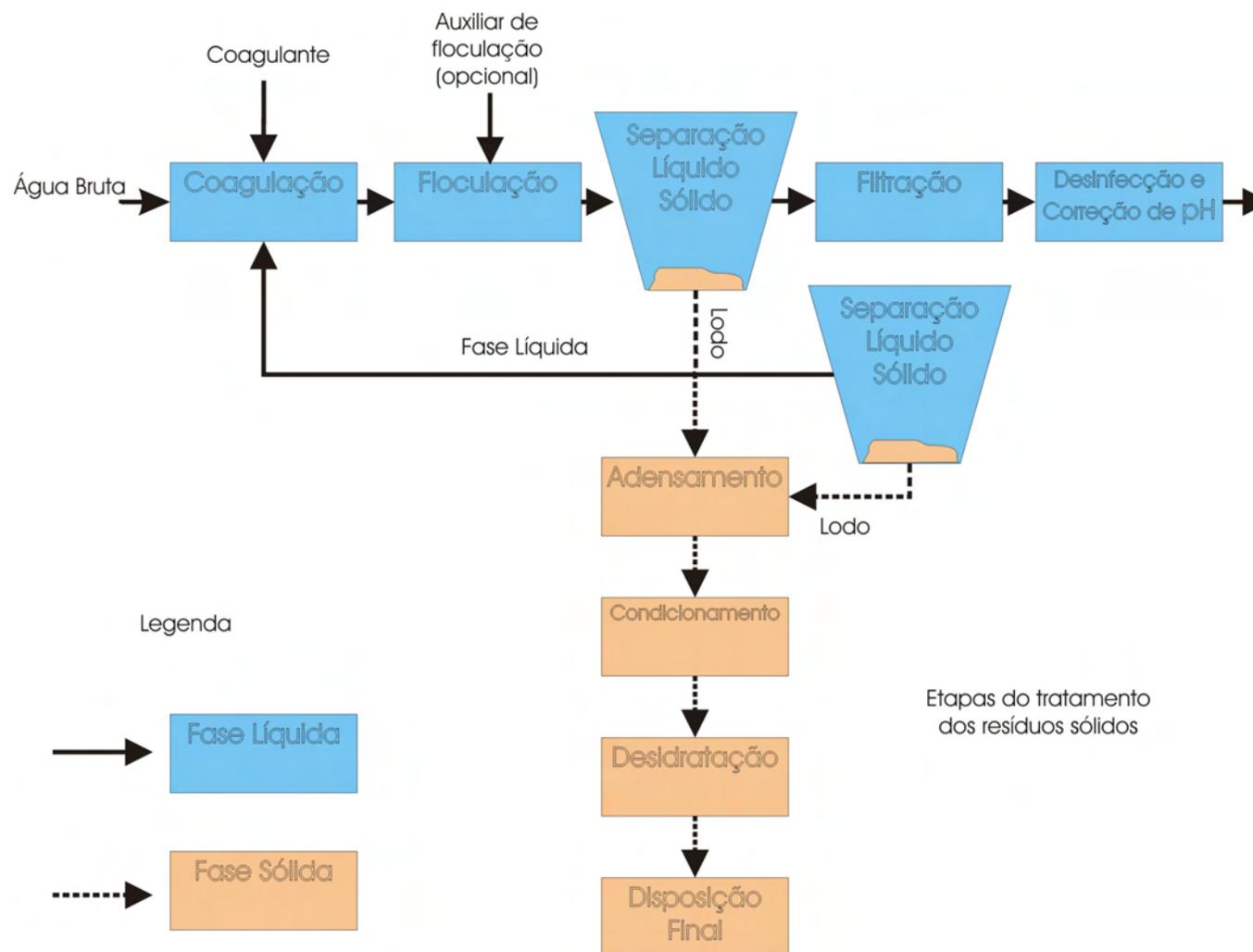


Figura 2.2 – Etapas do tratamento da água pelo processo de tratamento convencional, incluindo as etapas do tratamento dos resíduos sólidos. FONTE: Silva (2003).



Cordeiro (*in* Andreoli, 2001) fez uma análise histórica em relação ao desenvolvimento dos estudos sobre resíduos do tratamento de água elaborados no Brasil e verificou que os primeiros trabalhos ainda são recentes e foram realizados na década de 80, no 8º e 9º Congressos da ABES, respectivamente.

De acordo com AWWA (1995), as características do LETA o tornam mais similar ao solo que os lodos de esgotos. Neste caso, o nitrogênio e a matéria orgânica contida no LETA são, em geral, mais estáveis, menos reativos e em menores concentrações.

De acordo com Richter (2001) a aparência do lodo químico rico em alumínio varia em função da sua concentração de sólidos. Para concentrações de 0-5%: aparência líquida; de 8-12%: esponjoso ou semi-sólido; de 18 a 25%: argila ou barro suave. Esta última é a aparência do lodo da ETA-RD.

Na tabela 2.3 podem ser observadas algumas características dos lodos químicos ricos em Al gerados em várias estações de tratamento de água.

Os valores de referência de qualidade para solos estabelecidos pela CETESB foram obtidos por análises físicas e químicas de diversos solos do Estado de São Paulo, mediante tratamento estatístico dos dados, e faz referência ao solo limpo. Já os valores de prevenção foram determinados com base em ensaios com receptores ecológicos e referem-se as concentrações acima das quais podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo.

Como pode ser observado na Tabela 2.3, o lodo da ETA-RD apresenta teor de Cr similar ao da ETA-Maringá, mas considerado elevado pela CETESB para a qualidade dos solos. No entanto, as concentrações de Cr encontradas nos sedimentos da bacia do Rio Descoberto (Carmo *et al.*, 2003), que, segundo os autores, estão relacionadas à geologia da bacia, justificam o resultado obtido para o elemento no lodo da ETA-RD. No entanto, é mais provável que esses teores sejam antropogênicos, dada a destinação agrícola de parte das terras da bacia de drenagem. Os demais elementos estão bem abaixo dos valores de referência estabelecidos pela CETESB.

Pela comparação direta com outros lodos de estações de tratamento de água, pode-se observar valores elevados de Al que, muito provavelmente, se devem à abundância do Al nos solos intemperizados na região de Cerrado (Carmo *et al.*, 2003) que, por sua vez, deve ser somada as contribuições do sulfato de Al usado como coagulante.

A diferença entre as concentrações dos outros cátions também tem grandes possibilidades de estar relacionada às diferenças existentes entre os materiais carregados das bacias de drenagem que compõem o lodo dessas estações. No entanto, o Cu pode ter a sua origem na aplicação do algicida



sulfato de cobre para controle de floração de algas nos reservatórios. O baixo valor de cobre no lodo da ETA-RD também pode ser atribuído à inexistência desse tipo de controle na bacia do Lago Descoberto.

Tabela 2.3 – Concentrações elementares (mg.kg^{-1}) para lodos químicos ricos em Al de diferentes estações de tratamento de água, para sedimentos da bacia do Descoberto e para valores típicos de solo.

Parâmetros	ETA Lake Gaillard - Connecticut ¹	LETA ²	ETA de Maringá (PR) ³	Sedimentos bacia Rio Descoberto ⁴	ETA RD Ceilândia-DF	CETESB ⁵ Solos		Valores típicos para solo ¹
						Referência Qualidade	Prevenção	
Al	110000	49574	68600	10000-150000	184656	-	-	10000-300000
Ba	59			120-694	24,1	75	150	100-3000
Be	0,8				0,96	-	-	0,1-40
C		57000	58000		36000	-	-	
Ca	1303	161	7290	1000-16000	8643	-	-	7000-500000
Ce					21,13	-	-	
Cr	9	37	85,5	11-113	85,8	40	75	1-1000
Cu	1451	<33	445	5-43	23,9	35	60	3,8-94,9
Fe	7373	38791	75700	10000-80000	76923	-	-	7000-550000
K		563	2060	1000-27000	4500	-	-	
La				9-249	1,65	-	-	
Mg		1223	1990	1000-6000	607	-	-	
Mn		627	2090	14-1100	200	-	-	
Na		161		1000-7000	490	-	-	
Nd					2,05	-	-	
P	1672	2200	2890	70-2806	1226	-	-	200-5000
Si				200000-380000	143925	-	-	
Sr				7-46	5,34	-	-	
Ti				1000-8000	707	-	-	
V	23			14-136	187	275	-	20-500
Y				5-24	2,11	-	-	
Zn	64	76	527	10-120	34,6	60	300	8,0-126,0

(1) in Hyde & Morris (2000).

(2) Bidone *et al.* (2001).

(3) Valores médios extraídos de Lenzi *et al.* (2005).

(4) Carmo *et al.* (2003).

(5) CETESB, Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005.

Já o Ca e o Na foram interpretados como provenientes de ações antrópicas na bacia de drenagem do Lago Descoberto (Carmo *et al.*, 2003) e apresentam concentrações mais elevadas que as obtidas nos demais lodos da Tabela 2.3. Os teores de Ca elevados no lodo da ETA-RD também

são atribuídos ao uso de alcalinizante à base de Ca para a correção do pH que antecede a aplicação do coagulante no tratamento da água (Álvares, C. M., informação verbal).

Em pesquisas desenvolvidas na Universidade Federal do Espírito Santo, Gonçalves *et al* (1997) constataram que de 35 a 50% dos sólidos presentes no lodo de ETAs eram hidróxidos (formas precipitadas dos coagulantes utilizados no processo de tratamento). O hidróxido de alumínio formado no processo de tratamento apresenta-se como um floco gelatinoso que sedimenta lentamente e promove a agregação de outras partículas a ele durante o seu percurso.

ÁGUA, ALUMÍNIO E MEIO AMBIENTE



Para o consumo humano são utilizados 8% do total de água disponível. Já para agricultura e indústrias são consumidos respectivamente 70 e 22%, em média. Em situações extremas essas proporções podem chegar a 1% para o consumo humano e 99% para a agricultura, como acontece em Madagascar na África, Afeganistão na Ásia e Guiana na América do Sul. Por outro lado, em países industrializados, como a Finlândia, o consumo nas indústrias é de 85%, na agricultura 3%, e 12% para o consumo humano (ONU 1998 *apud* Philippi Jr & Malheiros, 2005).

É recente a visão da água como um recurso hídrico finito e vulnerável, e que pode representar obstáculo ao desenvolvimento das cidades e à qualidade de vida. A disponibilidade mundial *per capita* por ano de água doce reduziu de 17 mil m³ em 1950, para 7.300 m³ em 1995 (UN 1997 *apud* Philippi Jr & Malheiros, 2005). Em contrapartida estima-se que o consumo *per capita* de água no mundo na década de 1940 era em torno de 400 m³/habitante/ano, enquanto que na década de 1990 esse valor subiu para 800 m³/habitante/ano (BID 1992 *apud* Philippi Jr & Malheiros, 2005). Análises recentes mostram que países com disponibilidade abaixo de mil m³/*per capita*/ano podem apresentar problemas crônicos de escassez de água. Essa situação torna-se mais crítica com o aumento da poluição dos recursos hídricos e a não uniformidade de sua distribuição.

Embora seja indispensável ao organismo humano, a água pode conter determinadas substâncias, elementos químicos e microrganismos que devem ser eliminados ou reduzidos a concentrações que não sejam prejudiciais à saúde do ser humano. Grande parte das doenças que se alastram pelos países em desenvolvimento é proveniente da água de qualidade insatisfatória (tabela



2.4). As doenças de transmissão hídrica mais comuns são a febre tifóide e paratifóide, disenterias bacilar e amebiana, cólera, esquistossomose, hepatite infecciosa, giardíase e cryptosporidíase. Além desses males, os danos à saúde podem decorrer da presença de substâncias tóxicas na água (Di Bernardo *et al.*, 2002).

O principal benefício que a água proporciona à saúde pública é a prevenção das doenças infecciosas intestinais e helmintíases. Essas doenças são de baixa letalidade, porém de alta endemicidade, especialmente nas regiões mais pobres do planeta. Por atingir principalmente as crianças até cinco anos de idade, têm efeito devastador no crescimento e no desenvolvimento de aptidões, uma vez que levam à desnutrição e a situações de fragilidade que deixam os organismos dessas crianças sem defesa para outras doenças. Estimativas feitas pela OMS em 1990, considerando dados epidemiológicos de todos os países, indicaram que para cada óbito por doenças diarréicas houve 303 episódios ou pessoas infectadas. Já para as helmintíases essa relação foi de um óbito para 15 mil pessoas infectadas (WHO 1995 *apud* Philipii Jr & Malheiros, 2005).

No LETA da Estação de tratamento de Água Rio Descoberto estão sendo realizados estudos de viabilidade de ovos de helmintos pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal desde abril de 2003. As análises parasitológicas foram realizadas pelo Método Yanko (Thomaz Soccol *et al.*, 2000) e consistem na avaliação, em duplicatas de amostras compostas, da presença e da viabilidade ou não de ovos de *Ascaris sp*, *Toxocara sp*, *Trichuris sp* e *Hymenolepis diminuta*. Os resultados obtidos no lodo da ETA-RD mostram que apenas numa pequena fração de LETA houve presença de ovos de helmintos, sendo que deste montante a metade foi classificada como ovos inviáveis (Figura 2.3).

O potencial tóxico dos resíduos de ETAs depende principalmente das concentrações de metais presentes, além das características físico-químicas e das condições em que esses resíduos são dispostos.

Barroso & Cordeiro (2001) alertam para as ações tóxicas dos metais e do Al presente no lodo de ETA, com efeitos positivos ou negativos para os processos de tratamento, disposição final e reuso dos resíduos.

A possibilidade de lixiviação ou solubilização do Al é inclusive uma das maiores preocupações dos órgãos ambientais para a liberação de outorgas ou licenças para a operação de sistemas de abastecimento de água. Isto porque se aumenta o risco de contaminação do solo ou aquíferos da região onde há a disposição do lodo.



Tabela 2.4 – Doenças relacionadas à água.

Transmissão	Doença	CID 9	CID 10	Agente Patogênico	Ação
Pela água	Cólera	001	A00	Vibrio cholerae	Implantar sistema de abastecimento de água
	Febre Tifóide	002.0	A01.0	Salmonella typhi	
Leptospirose	100	A27	Leptospira interrogans		
Giardíase	007.1	A07.1	Giárdia lamblia		
Amebíase	006	A06	Entamoeba histolytica		
	Hepatite infecciosa	070.1	B15	Hepatite vírus A	
	Diarréia aguda	001-009	A00-A09	Balatum coli, Cryptosporidium, Bacillus cereus, S. aureus, Campylobacter, E. coli entero toxogênica e enteropatogênica, Shigella, Yersinia enterocolítica, astrovírus, calicivírus, Norwalk, Rotavírus A e B	Proteção dos mananciais
Pela falta de água	Escabiose	133.0	B86	Sarcoptes scabiei	Implantar sistema de esgotamento sanitário
	Pediculose (piolho)	132	B85	Pediculus humanus	
	Tracoma	076	A71	Chlamydia trachoma	Instalar abastecimento de água com encanamento no domicílio
	Conjuntivite bacteriana aguda	372.0	H10.0	Haemophilus aegyptius	
	Salmonelose	003	A02.0	Salmonella typhimurium	Instalar melhorias sanitárias domiciliares e coletivas
	Tricuríase	127.3	B79	Tricuris trichiura	
Enterobíase	127.4	B80	Enterobius vermiculares	Instalar reservatório de água adequado com limpeza sistemática	
Ancilostomíase	126	B76	Ancylostoma duodenale		
Ascaridíase	127.0	B77	Ascaris lumbricoides		
Por vetores que se relacionam com a água	Malária	084	B50 B54	Plasmodium vivax, P. malarie e P. falciparum	Eliminar aparecimento de criadouros com inspeção e medidas de controle
	Dengue	061	A90	Grupo B dos arbovírus	
	Febre amarela	060	A95	RNA vírus	Dar destinação final adequada aos resíduos sólidos
Filariose	125.0	B74.0	Wuchereria bancrofti		
Associado à água	Esquistossomose	120	B65	Schistosoma mansoni	Controle de vetores e hospedeiros intermediários

FONTE: Funasa (1999) acrescido da Classificação Internacional de Doenças – cid 9, revisão de 1975 e a correspondente Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde – cid 10, revisão de 1997 (in Philippi Jr & Malheiros, 2005).

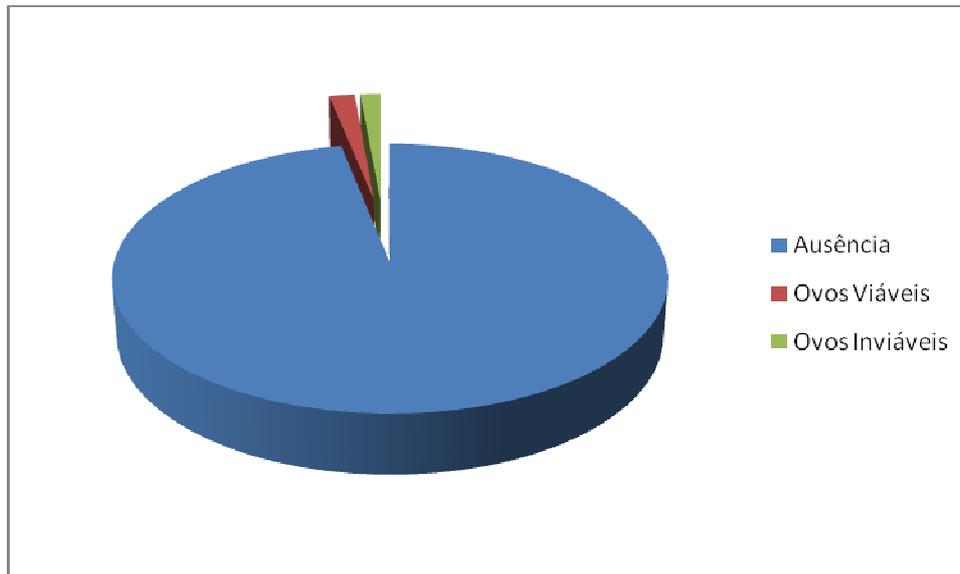


Figura 2.3 – Análise parasitológica em amostras compostas do lodo da ETA-RD. Resultados médios de duplicatas para a pesquisa e estudo da viabilidade de ovos de helmintos.

ALUMÍNIO - IMPORTÂNCIA SANITÁRIA

O Al não ocorre na forma de metal livre e possui apenas um estado de oxidação. O transporte e distribuição no ambiente dependem das características físicas e da composição química do local de ocorrência. Quando o pH é superior a 5,5, os compostos de Al normalmente apresentam-se sob formas insolúveis. Como exceção, a presença de matéria orgânica dissolvida ou de ácidos húmicos pode mobilizar o Al mesmo em pH elevado (Imray *et al*, 1998).

A mobilidade de Al no solo ou na água tratada pode ser danosa, sobretudo porque esse elemento é considerado não essencial para plantas e animais, não sendo conhecida nenhuma função bioquímica nos organismos que seja dependente desse metal (Pereira & Reis, 2002). O Al é particionado na biota por diferenças nas afinidades ácido-básicas, por sua cinética, por forma temporal e, espacialmente, pelas membranas e compartimentos. Um dos aspectos da toxicidade desse metal, embora não seja o único, é a combinação química entre metais e ligantes no organismo (Merian & Clarkson, 1991).

Echart & Cavalli-Molina (2001) estudaram a fitotoxicidade do Al e constataram que esse metal é um dos principais responsáveis pelo baixo desenvolvimento de plantas economicamente importantes em solos ácidos. Isso porque em solos tropicais e subtropicais úmidos, com altas precipitações pluviométricas, os nutrientes solúveis como Ca, Mg, K e outros elementos básicos são lixiviados resultando, assim como a mineralização da matéria orgânica por microrganismos do solo,



na diminuição do pH. Em baixo pH, o H^+ atua sobre os minerais liberando íons Al que ficam predominantemente retidos pelas cargas negativas das partículas de argila do solo, em equilíbrio com o Al^{3+} em solução. Portanto, a quantidade de Al^{3+} em solução aumenta com a acidez do solo (Bohnen, 1995 *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001). A toxicidade do Al em plantas se dá pela inibição do crescimento da raiz que resulta em danos do sistema radicular, que pode conduzir à deficiência mineral e estresse hídrico (Degenhardt *et al*, 1998 *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001). Isso porque o Al tem preferência por doadores de oxigênio e alta afinidade por grupos carboxila e fosfato, ligando-se principalmente aos componentes da parede celular. Devido ao antagonismo entre Al e o Ca, e o potencial do Al^{3+} em interagir com qualquer sistema que usa Mg^{2+} ou qualquer forma de fosfato, o Al pode inibir um grande leque de processos metabólicos essenciais regulados por Ca, proteínas regulatórias ligadas a GRP e hexoquinases e a divisão celular pode ser posteriormente afetada por tais alterações metabólicas (Martin, 1988; Rengel, 1992, *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001).

O Al está presente na vida das pessoas sob diversas formas, sejam naturais ou antrópicas, por causa da exposição ao Al proveniente do solo, da água, do ar, dos alimentos, dos medicamentos e dos produtos manufaturados.

Diversos estudos epidemiológicos associaram o Al da água tratada à incidência do Mal de Alzheimer, que é uma doença cerebral degenerativa caracterizada pelo grande número de estruturas neurofibrilares e placas senis em diversas partes do cérebro, embora se observe que apenas de 1 a 2% da ingestão diária do Al seja proveniente da água. Segundo ABAL (2000), alguns pesquisadores, durante a década de 80, encontraram níveis elevados de substâncias como Al, Hg, Pb, Br, Fe e Co no cérebro de pacientes que morreram da Doença de Alzheimer. A hipótese mais aceita é que o acúmulo desses elementos seja conseqüência e não causa da doença.

Outros estudos epidemiológicos não encontraram qualquer ligação entre o Al presente na água ingerida e a doença de Alzheimer (Stauber *et al.*, 1999).

Pacientes com graus variados de insuficiência renal têm a via de excreção do Al comprometida e tornam-se potenciais candidatos à intoxicação crônica (Jeronymo & Fujimura, 1998). O acúmulo corporal e a conseqüente toxicidade do Al ocorrem principalmente em indivíduos com insuficiência renal crônica. A anemia, a hipercalcemia, a osteodistrofia renal e a encefalopatia dialítica são exemplos de doenças provocadas pelo acúmulo de Al (Pereira & Reis, 2002; Silva, 1998).



Como exemplo do risco de acúmulo desse metal, Berend *et al.* (2001) relataram a morte de dez pessoas por encefalopatia aguda por Al, atribuída a lixiviação de Al e Ca da argamassa da tubulação do centro de diálise em Curaçao. Na maioria dos casos relatados, a concentração de Al no sangue das pessoas que foram a óbito foi significativamente maior que nos sobreviventes.

Nesse contexto, uma atenção especial deve ser dada neste estudo à geoquímica do Al no meio ambiente.



CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA

O clima do Distrito Federal caracteriza-se por dois períodos distintos. O período seco se estende de maio a setembro e caracteriza-se por baixas precipitações, alta taxa de evaporação e baixos valores de umidade relativa do ar, algumas vezes inferiores a 15%. O período chuvoso, de outubro a abril, teve o índice pluviométrico de 1450 mm (out/07 a abr/08, Estação ETE Melchior. Fonte: PHIHM/CAESB). As temperaturas médias variam de um mínimo de 19°C nos meses de junho e julho até ápices de 22°C nos meses de março e setembro (Barbosa *et al*, 2003).

No DF, ocorrem rochas metassedimentares pertencentes aos Grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, distintos principalmente pelas correlações regionais com outras áreas da Faixa Brasília, pela intensidade de deformação e metamorfismo destas unidades e pela natureza dos litotipos.

O Grupo Paranoá corresponde a uma unidade psamo-pelito-carbonatada de idade Meso/Neoproterozóica interpretada como uma seqüência de deposição plataformal com variações na lâmina d'água no decorrer do tempo (Campos & Freitas-Silva *in* Fonseca, 2001).

Observou-se um aumento na intensidade de deformação e metamorfismo nas rochas do Grupo Paranoá de leste para oeste. No entanto, o metamorfismo regional não chegou a alcançar a zona da clorita e os padrões de deformação indicam níveis crustais rasos (Fuck, 1994).

Freitas-Silva & Campos (1995) descrevem as coberturas terció-quadernárias como provenientes de processos de intemperismo predominantemente químico, sob condicionantes geológicos, climáticos, topográficos, morfológicos, dentre outros, durante o Cenozóico. Estes processos proporcionaram o desenvolvimento de um extenso manto de intemperismo que alcança espessuras maiores que 50 metros.

A área de estudo, que corresponde a uma cascalheira desativada, está localizada nas proximidades da cidade de Ceilândia-DF (Figura 3.1). Nesta área, o resíduo do tratamento da água do Lago Descoberto está sendo disposto diretamente sobre o regolito exposto após a extração da crosta laterítica. Constituem as chamadas “cascalheiras”, couraças lateríticas ferruginosas, que ocorrem nas bordas das chapadas (altitude 1050-1150m). A cascalheira utilizada, de acordo com o Mapa Geológico do DF, está posicionada sobre a unidade R4 do Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozóica (Campos & Freitas-Silva, 1998). A unidade R4 é um metarritmito homogêneo formado por intercalações centimétricas regulares de metassiltitos argilosos, metapelitos e quartzitos finos que apresentam coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada em função dos diferentes condições de intemperismo.

O solo original na cascalheira já não existe mais, devido à retirada da cobertura laterítica. O lodo é disposto diretamente sobre o regolito, definido como material decomposto que repousa sobre a rocha-matriz, sem ter sofrido transporte.

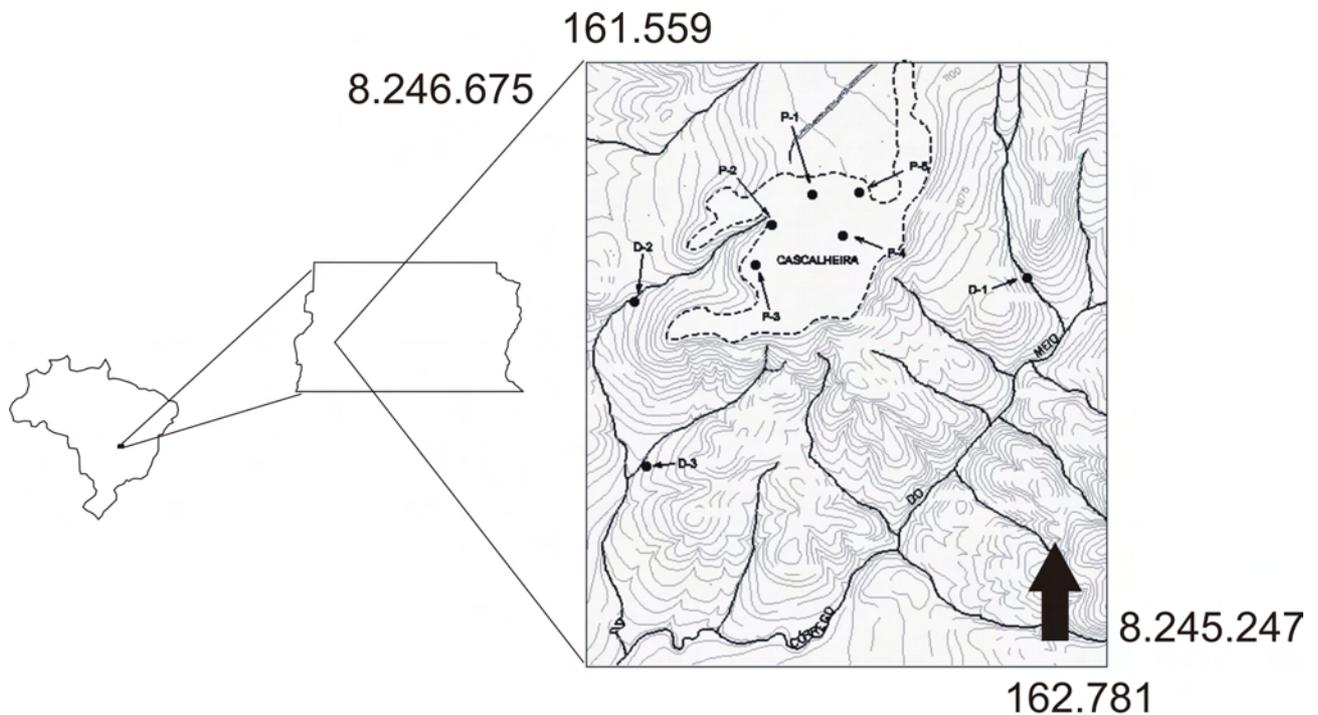


Figura 3.1 – Área de estudo. Destaque para a localização dos poços de monitoramento (P1, P2, P3, P4 e P5) e das drenagens (D1, D2 e D3). Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator-UTM / SICAD).



A área de disposição do LETA corresponde a um platô com cerca de 75.000 m², com declividade média de 3,5% em sua maior extensão (NE-SW). As linhas de drenagem têm preferencialmente o sentido sudeste, desembocando a cerca de 500 metros no Córrego do Meio, ou Matadouro.

Apesar de modificada em seu aspecto original, pode-se ainda identificar, feições de vegetação do tipo campo sujo e campo limpo, em áreas preservadas.

A profundidade da superfície freática é superior a 10 m em toda a área de estudo. Foram encontrados dois poços na região, sendo um poço profundo à jusante da área e um poço raso à montante (cisterna). Embora ambos estejam desativados, a cisterna está sendo utilizada como fossa séptica.

O local de disposição do LETA é circundado por estradas de acesso e pequenas propriedades rurais, ocorrendo áreas degradadas com baixo índice de revegetação. É hábito da comunidade local, a utilização de voçorocas e ravinas como lixões, o que facilita o transporte de contaminantes do lixo para o lençol freático e drenagens.

BACIA DO LAGO DESCOBERTO

Resumindo-se, o lodo da ETA-RD é uma mistura dos produtos químicos utilizados no tratamento da água com os sólidos em suspensão provenientes da água do Lago Descoberto. Sendo assim, consideram-se importantes as informações referentes à bacia hidrográfica do Lago Descoberto para subsidiar os estudos do LETA quanto a sua composição.

O rio Descoberto nasce nos contrafortes da Chapada da Veredinha no Planalto Central Brasileiro e faz parte da bacia de drenagem do alto Corumbá, Paranaíba e Paraná. Recebe seu nome a partir da junção do córrego Capão da Onça com o córrego Barroirão, a montante do reservatório formado na bacia, a uma cota de aproximadamente 1.250 m. Inicialmente prossegue na direção NW e, a partir da confluência, evolui para o sul, formando a represa ou Lago Descoberto na cota de 1.030 m, próximo à Brazlândia (DF) e Águas Lindas (GO).

O Lago Descoberto está localizado a noroeste do Distrito Federal (a 40km do centro de Brasília), entre os paralelos 15°42'S e 15°47'S e os meridianos 48°10'W e 48°11'W. Com capacidade de armazenamento de até 102,3 hm³, destina-se ao abastecimento público e a outros usos múltiplos e recebe a contribuição dos córregos Chapadinha, Olaria e Capão Bonito, dos ribeirões Rodeador e das Pedras e por pequenos afluentes em sua margem direita, no estado de Goiás. Possui uma área de contribuição direta de 62 km², a área de drenagem de seus tributários é



de 360,25 km², seu tempo de retenção é de 125 dias e conta ainda um espelho d'água de aproximadamente 15 km², volume de 120 milhões de m³ de água, com profundidade média de 8m e máxima de 22m (Farah, 2001).

O relevo da bacia de drenagem do lago é constituído por formas suavemente onduladas, em cerca de 60% da área, com declividade variando entre 0 e 10%. As áreas com declividades compreendidas entre 10 e 20% abrangem cerca de 19,5% do total, localizando-se principalmente nas partes mais elevadas. Cerca de 12% da área tem declividades entre 20 e 30%, e 4,5% apresentam declividades superiores a 30%, situando-se às margens dos tributários. O relevo é bastante acidentado na parte central da bacia e evidenciado pela densidade de córregos e riachos (SEBRAE, 2004).

Os solos de cerrado, encontrados no entorno da represa, são caracterizados pela baixa fertilidade natural, elevada acidez, baixa capacidade de troca de cátions, alta capacidade de fixação de fósforo (P), alta saturação de alumínio (Al) e deficiência quase generalizada de macro e micro nutrientes (Moreira *et al.*, 2003).

A captação do Rio Descoberto, maior manancial de abastecimento do DF, contribuiu com 97% da produção do Sistema Rio Descoberto que, por sua vez, correspondeu a 63% do total da água de abastecimento produzida pela CAESB em 2004. As áreas urbanas abastecidas por essa captação estão localizadas nas Regiões Administrativas de Taguatinga, Sítio do Gama, Novo Gama, Ceilândia, Samambaia, Gama, Núcleo Bandeirante (SMPW), Santa Maria, Recanto das Emas, Riacho Fundo (I e II), Candangolândia, Guará (I e II), além de fornecer água para o Sistema Integrado Santa Maria/Torto, abrangendo as Regiões Administrativas de Brasília, Lago Sul e Cruzeiro (CAESB, 2004).

Segundo Farah (2001) a ocupação do solo na área total de 422 km² da bacia hidrográfica do Lago Descoberto está assim distribuída: a mata ciliar ocupa 12,19 km², o cerrado 141,75 km², as cascalheiras ocupam 2,4 km², o uso de terras para fins agrícolas representam 153,23 km² de área ocupada, o campo para reflorestamento é de 70,26 km², os Campos de Morundu ocupam 12,57 km² e as áreas urbanas e loteamentos representam cerca de 29,85 km².

Lima (2004) relata que à montante do Lago Descoberto observa-se a existência de loteamentos rurais destinados à agricultura intensiva, desenvolvimento de atividades de suinocultura em escala comercial, além de criações extensivas de gado bovino. Observa-se também a existência de agricultura familiar, principalmente destinada ao cultivo de hortifrutigranjeiros. Como impacto resultante, verifica-se a degradação ambiental da área, decorrente do uso intensivo



do solo, sem adoção de práticas de conservação. Em seguida, destaca-se uma ocupação bastante desordenada – a invasão da vila São José (Brazlândia), que abriga cerca de 40 mil pessoas. A ação antrópica resultante dessa falta de planejamento é ocasionada pela retirada da mata de galeria e de cascalho, além do aumento da impermeabilização do solo. A diminuição da mata de galeria e de cascalho aumenta a possibilidade de contaminação dos cursos d'água por sedimentos, resíduos de adubos, defensivos agrícolas, etc, conduzidos pelo escoamento superficial. O aumento da impermeabilização, por sua vez, diminui a infiltração e acelera o escoamento superficial que arrasta resíduos para os cursos d'água. Destaca-se, nessa região, à montante do Lago Descoberto, pouco expressiva parcela de atividade industrial, compreendendo pequenas empresas de extração mineral e de transformação. Até a altura do Lago, a predominância de chácaras produtivas às margens e ao longo dos tributários, associada aos aglomerados urbanos existentes, constitui-se no principal responsável pelos aportes de nutrientes para o lago.

Silva (2003b) relata que na cidade de Águas Lindas as áreas urbanas apresentam sérios problemas relacionados a erosões lineares, decorrentes da falta de redes pluviais e pavimentação das ruas. A urbanização concentra os fluxos superficiais das águas meteóricas. O risco à contaminação é moderado a alto nos compartimentos chapadas elevadas, onde está concentrada a maior parte da área urbana, e planos intermediários, que são menos ocupados.

As atividades rurais que usam agrotóxicos e movimentam o solo, bem como a ocupação urbana progressiva e desordenada, em especial nas margens pertencentes ao Estado de Goiás, têm sido motivo de grandes preocupações por parte da CAESB, uma vez que estas ocupações estão associadas a diferentes tipos e intensidades de impacto no solo que, por sua vez, provocam a degradação da qualidade da água no manancial.

Carmo *et al.* (2003) estudaram a geoquímica dos sedimentos de corrente da bacia hidrográfica do Rio Descoberto por meio de análises sazonais dos elementos Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, P, V, La, Co, Zn, Sr, Y, Si, Ti, Al, Fe, Ca e Mg, usando espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES), Na e K, usando espectrometria de absorção atômica (AAS), além de análises granulométricas e determinações de materiais voláteis. Os autores associaram a matéria orgânica e os elementos P, Ca, Na, Ba, K e Mn presentes em sedimentos de corrente às atividades agrícolas e/ou urbanas nos ambientes lóticos da bacia hidrográfica do Rio Descoberto. A presença de Al nos sedimentos foi associada ao decapeamento da área pelos processos erosivos, mostrando a origem geológica do metal. De forma semelhante, o Si apresentou concentrações mais elevadas no período chuvoso, indicando o aumento do transporte (físico e/ou químico). Os autores



consideraram a ausência de mata ciliar como um importante fator para o enriquecimento dos elementos em sedimentos de rios e mananciais da área.

Um estudo geoquímico mais específico à bacia hidrográfica do Lago Descoberto foi desenvolvido por Santos (2003). Nesse trabalho, Santos estudou a geoquímica dos sedimentos de fundo do Lago por meio de análises na fração <0,063mm dos elementos Fe, Al, Mg, Ca, Ti, Sr, V, Ni, Cu, Cr, Mn, Ba e Zn, utilizando ICP/AES, Hg usando espectrofotometria de absorção atômica com geração de vapor frio (CV/AAS), além das avaliações de matéria orgânica e mineralogia por difratometria de raios X. A autora associou tanto os elementos Fe, Al, Ti, V e Cr, como a presença dos minerais caolinita, illita, gibbsita, goetita, vermiculita, rutilo e quartzo, à geologia da região. Os processos de erosão e/ou intemperismo do solo e das rochas do Grupo Paranoá seriam responsáveis pelo aparecimento desses minerais e elementos nos sedimentos do Lago Descoberto. Os metais Mg, Ca, Ni e Mn estariam associados, segundo a autora, tanto à geologia quanto às fontes antrópicas. Já os elementos Hg, Zn, Cu, Ba e Sr seriam provenientes, principalmente, de fontes antrópicas, onde os dois primeiros estariam relacionados a influência urbana e os três últimos às práticas agrícolas desenvolvidas na bacia. A conclusão final da autora é que, apesar de notar enriquecimento de certos elementos devido à ação antrópica, os sedimentos de fundo do Lago Descoberto não apresentam contaminação ou poluição. No entanto, foram identificadas ameaças a qualidade das águas desse manancial devido ao uso inadequado de suas áreas limítrofes, seja pela degradação ambiental promovida pelas atividades agrícolas, seja pelo processo de ocupação urbana na bacia.



CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

O estudo comparou a superfície sobre a qual é depositado o lodo (cascalheira desativada) com outra área adjacente preservada. Para tanto, foram utilizados levantamentos geofísicos, geoquímicos e análises mineralógicas dos diversos materiais.

Os procedimentos analíticos foram executados nos laboratórios de Geoquímica, Geofísica e Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, bem como no Laboratório Central da Unidade de Monitoramento e Informações de Recursos Hídricos - PHI/CAESB.

COLETA DE AMOSTRAS

As amostras de solo foram coletadas em três oportunidades. Trinta amostras foram coletadas metro a metro em três pontos de sondagem (1), 54 amostras de solo, na profundidade de 10 a 20 cm, em uma malha regular de 6x9 pontos a cada 50 metros (2) e 45 amostras, a cada 3 metros de profundidade, nos cinco poços perfurados para a instalação dos poços de monitoramento (3).

Em setembro de 2004 as coletas foram realizadas na cascalheira e na área de controle, por meio de três sondagens mistas (rotativa e percussão), de dez metros cada, sendo duas delas na área de influência (S1 e S2) e uma à área de controle (S3) (Figuras 4.1 e 4.2). As sondagens foram executadas segundo as recomendações da Norma Brasileira NB-12-R e em alguns casos específicos pela ASTM e DIN. A extração das amostras, coletadas metro a metro, foi feita por ensaio de penetração dinâmica com cravação de um amostrador padronizado de 34,9mm e 50,8mm de diâmetros, interno e externo, respectivamente. Esse ensaio consistiu na contagem do número de golpes necessários para que um peso de 65 kg, caindo de 75 cm de altura, fizesse um barrilhete amostrador penetrar 30 cm no terreno (Topocard, 2004) (Figura 4.2). O número de golpes obtidos fornece a compacidade dos solos de predominância siltosa ou arenosa, e a consistência dos solos de predominância argilosa.

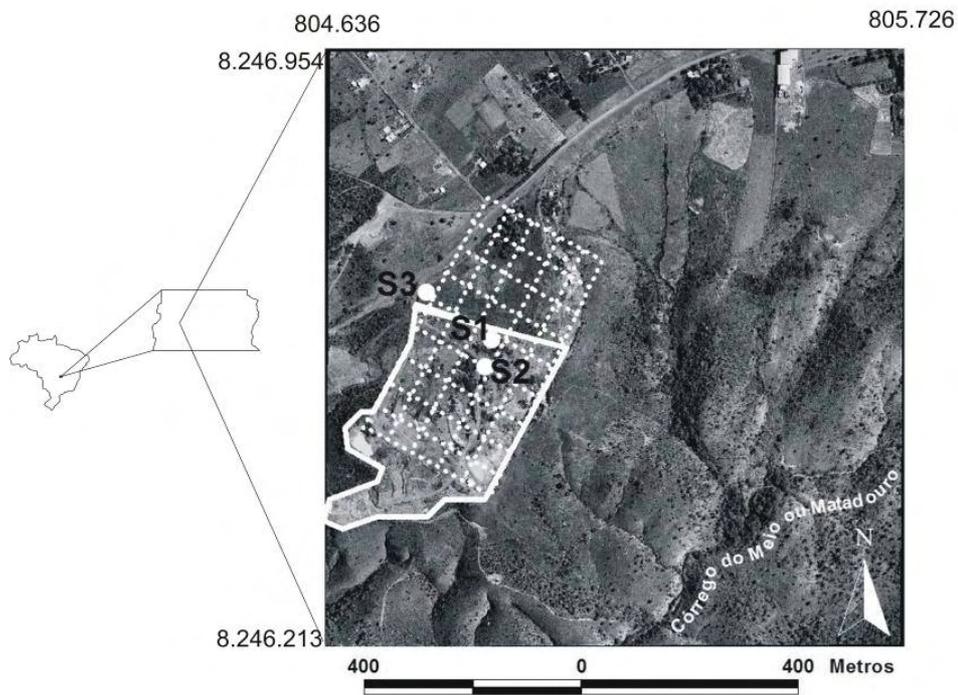


Figura 4.1 – Localização da área de estudo. Em destaque a área da cascalheira (—), a malha de resistividade (...) e os pontos de sondagem (●). Coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), datum Astro Chuá.



Figura 4.2 – Sondagem mista (rotativa e percussão) realizada na área de disposição do lodo da ETA-RD na cascalheira (Ponto S1).



Na segunda oportunidade, a amostragem foi realizada por trado padrão AMS, construído com liga especial de aço carbono e extremidade em vídia de tungstênio. Em junho de 2006, 54 amostras foram extraídas do intervalo entre 10 e 20 cm de profundidade, segundo a malha regular de 50 metros. Esta malha é formada por 9 e 6 linhas ortogonais, nomeadas, respectivamente, de A até F com direção (NW-SE) e de 2 a 10 (Figura 4.6). Os pontos foram escolhidos no escritório e localizados em campo com GPS, da marca Garmin, modelo 45XL. Após a coleta, as amostras foram quarteadas, sendo retiradas alíquotas para as diversas análises. Posteriormente, a fração de interesse referente a granulometria menor igual a 2 mm foi separada, constituindo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Na terceira oportunidade, em setembro e outubro de 2006, foram coletadas amostras de solo dos poços de monitoramento perfurados (Figuras 4.3 e 4.4). A cada 3 metros de perfuração foi retirada uma amostra representativa desse intervalo. Após a coleta, as amostras foram ensacadas, etiquetadas e transportadas para o Laboratório Central da CAESB. A etapa seguinte foi destorroá-las manualmente e submetê-las à secagem ao ar em local ventilado. Após a secagem, as amostras foram quarteadas, sendo retiradas alíquotas para os diversos ensaios. O restante das amostras foi estocado para eventuais contraprovas. Posteriormente, a fração de interesse referente à granulometria menor igual a 2 mm foi separada, constituindo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

As coletas preliminares para a verificação da qualidade da água superficial foram realizadas nos meses de maio de 2004 e junho de 2005. O objetivo foi avaliar a probabilidade de contaminação da água dos córregos próximos à cascalheira com o material do lodo químico proveniente do tratamento da água do Sistema Rio Descoberto.

As amostras das drenagens próximas a área da cascalheira foram coletadas, à aproximadamente 50 cm de profundidade, conforme procedimentos constantes no Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água da CETESB (1988).

Para as águas superficiais, os parâmetros determinados nas duas campanhas foram: cor, pH, turbidez, cloreto, condutividade, K, Na, Al, Ca, N total, nitrogênio de nitratos ($N-NO_3^-$), nitrogênio amoniacal, alcalinidade, dióxido de carbono livre, e seguiram as metodologias adaptadas de APHA, AWWA & WPCF (1998). Em junho de 2005 foram realizadas as análises de SO_4^{2-} , Sr, La, Y, Ti, V, Mg, Fe, Si, Ni, Zr, Cu, Cr, Mn, Ba, Co, Zn, Cd, P e Mo, em duas drenagens da cascalheira. As técnicas empregadas nestas análises complementares foram a de espectrofotometria eletrotérmica de absorção atômica para Cd, turbidimetria para a determinação de sulfato e espectrometria de emissão



óptica com plasma indutivamente acoplado para os demais elementos. Os resultados foram avaliados por análise de agrupamento.

Nessa avaliação preliminar não foram levantados fatos que pudessem comprovar a ocorrência de contaminação nas nascentes nas proximidades da área de estudo, porventura provenientes dos despejos de lodo de tratamento da água do Sistema Rio Descoberto (resultados em anexo). Os baixos valores obtidos para SDT, cloretos, nitratos, sódio, alumínio e cálcio, nessas nascentes contradizem a hipótese de contaminação dessas águas pelo LETA, já que esses parâmetros deveriam estar elevados nestas amostras.

O Córrego do Meio poderia servir de *baseline* para esses estudos, uma vez que faz parte da bacia de drenagem e não recebe contribuição direta da cascalheira no ponto coletado. No entanto, a contaminação de suas águas o descredencia para esse papel.

A análise de agrupamentos (*Hierarchical Cluster Analysis*) mostrou ser uma boa ferramenta para avaliação ambiental, uma vez que apresentou forte afinidade entre os parâmetros indicadores de contaminação, evidenciando o comprometimento da qualidade das águas de alguns mananciais como o Córrego do Meio e, na época, o Ribeirão Chapadinha.

Posteriormente, para a avaliação da qualidade da água na área impactada, foram obtidas amostras de superfície em drenagens e de água subterrânea por meio de poços de monitoramento. Cinco poços foram perfurados em setembro e outubro de 2006. Para tanto, foi utilizada a sondagem por percussão com jato d'água (Figura 4.3). A água foi encontrada na camada correspondente ao metarritmito fresco nas profundidades de 25, 25, 21, 27 e 31 metros para os poços P1 a P5, respectivamente. A perfuração prosseguiu por mais 1 metro na zona saturada. A localização dos poços está indicada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Localização dos poços de monitoramento. Datum: Astro Chuá.

Poço de Monitoramento	UTML	UTMN	ELEVAÇÃO (m)	NÍVEL DA ÁGUA (m)
P1	804835	8246829	1102	25
P2	804752	8246764	1101	25
P3	804706	8246647	1091	21
P4	804903	8246729	1096	27
P5	804944	8246833	1092	31

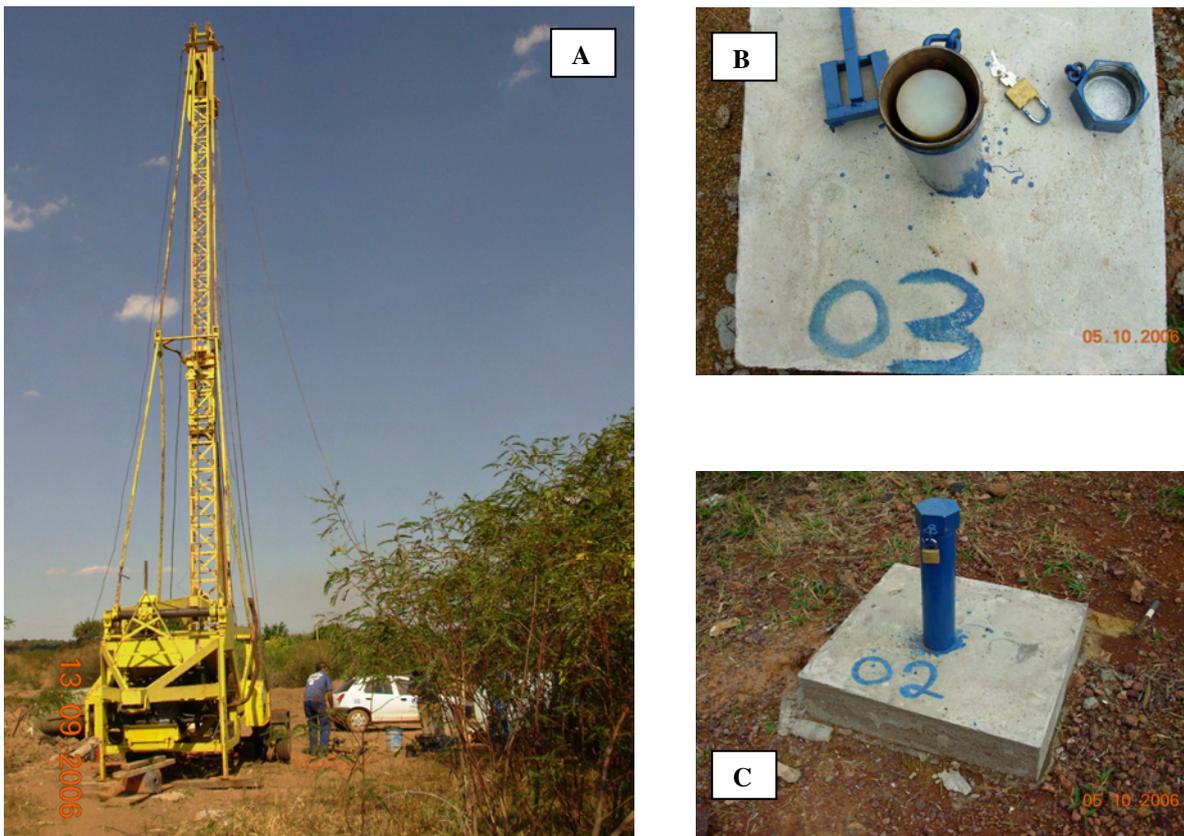


Figura 4.3 – Instalação dos poços de monitoramento na área de estudo por sondagem por percussão com jato d’água. A) Equipamento utilizado nas sondagens; B) Detalhe interno do poço de investigação (chave, tubo de aço de 6”, tubo geomecânico vedado com rolha de silicone inerte, cadeado e tampa rosqueável); C) Poço instalado.

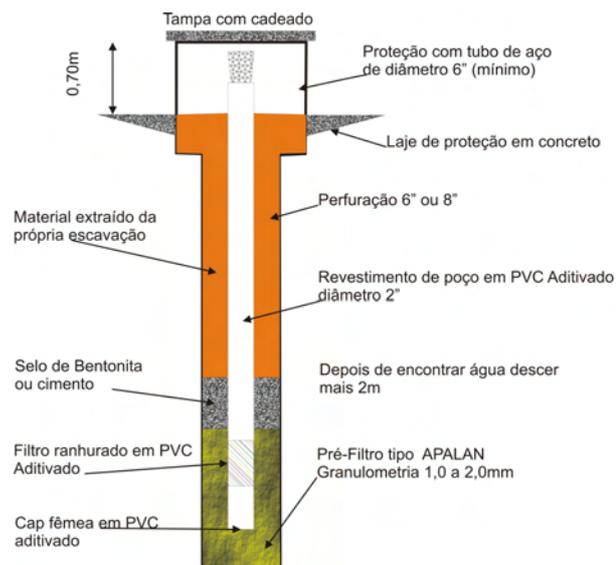


Figura 4.4 – Projeto do poço de investigação gentilmente cedido pelo Professor José Elói Guimarães Campos.



Amostras de três drenagens próximas a área da cascalheira foram coletadas em três momentos durante o período de chuvas, à aproximadamente 30 cm de profundidade (CETESB, 1988). As drenagens foram denominadas D1 (montante da área de disposição do LETA), D2 e D3 (jusante da área). O período chuvoso foi escolhido devido ao caráter intermitente ou efêmero de D2 e D3, que são as drenagens mais importantes para a avaliação ambiental. As águas subterrâneas foram coletadas mensalmente, de janeiro a dezembro de 2007, com o auxílio de amostradores de polietileno para cada poço. O nível estático do poço foi medido antes da coleta das amostras de água. O branco de amostragem foi retirado para verificar se houveram contaminações do material de coleta.

Os parâmetros pH, temperatura da água, condutividade e sólidos dissolvidos totais (SDT) foram medidos no campo. As amostras de águas superficiais e subterrâneas foram acondicionadas sob refrigeração em frascos de polietileno (para análises físicas e químicas), de polietileno contendo 1,5mL de HNO₃/L (para análises de elementos traço) e em frascos esterilizados de vidro (para análise bacteriológica). O tempo entre a primeira coleta e o início das análises no laboratório foi sempre inferior a 4 horas. No laboratório foram analisadas turbidez, Cl⁻, K, Na, Al, Ca, nitrogênio de nitratos (NO₃⁻), nitrogênio de nitritos (NO₂⁻), nitrogênio amoniacal, CO₂ livre, SO₄²⁻, Se, Hg, Sb, Pb, Ag, Mg, Fe, As, Ni, Cd, Cu, Cr, Mn, Ba, Co, Zn, Li, P, HCO₃⁻, CO₃²⁻, alcalinidade total, dureza total, oxigênio consumido, F⁻, coliformes totais e coliformes termotolerantes das amostras (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação das estruturas de subsuperfície por meio da aquisição e interpretação de dados instrumentais, por meio das propriedades físicas dos materiais como, por exemplo, condutividade, resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade, etc.

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea, são o geo-radar (GPR), o eletromagnético indutivo (EM), a eletrorresistividade (ER) e a magnetometria. A vantagem desses métodos em relação a outros métodos geofísicos consiste basicamente na capacidade de detecção direta da contaminação subterrânea e não apenas na identificação das feições geológicas e



hidrogeológicas das áreas em estudo, que é uma das premissas do diagnóstico ambiental de áreas contaminadas. Sendo assim, pode-se determinar além da natureza da contaminação, o comportamento dos contaminantes no solo e nas águas subterrâneas (CETESB, 2001).

Os desvios significativos do padrão normal das medidas geofísicas, que são as anomalias, podem do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em subsuperfície. Essa interpretação permite, inclusive, indicar a intensidade da contaminação presente, a fim de proporcionar importantes informações para as atividades de diagnóstico, monitoramento da propagação dos contaminantes e acompanhamento da recuperação de uma área degradada.

O método da eletrorresistividade é um dos mais utilizados em estudos ambientais e baseia-se na condução de corrente elétrica nos diversos materiais. A propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá pelo deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, quantidade de água e teor e natureza dos sais dissolvidos. Desses fatores, a salinidade e a quantidade de água são os mais importantes e permitem a imensa possibilidade de aplicações em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água na zona saturada e o aumento da concentração de contaminantes podem ser investigados. Outro fator relevante é a variedade de técnicas que esse método permite, possibilitando investigações no sentido vertical (Sondagem Elétrica Vertical – SEV) ou lateral (Caminhamento Elétrico), além de uma diversidade de arranjos de campo (*Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo*, entre outros), conferindo ao método grande versatilidade.

A dissolução, falhamento, cisalhamento e intemperismo normalmente aumentam a porosidade e a permeabilidade dos fluidos, elevando a condutividade das rochas.

Nascimento (2003) utilizou o método de resistividade elétrica para a avaliação dos solos de cerrado. A percepção de que os solos argilosos são menos resistivos eletricamente que os solos arenosos independentemente da umidade, torna promissor o uso dessa metodologia na investigação da contaminação ou não do lodo químico na área da cascalheira.

Stevanato *et al* (2003) utilizaram as análises químicas e os métodos elétricos para o mapeamento de pluma condutiva do aterro sanitário de Itajaí-SC. A avaliação em conjunto dos resultados geofísicos e geoquímicos permitiu aos autores associar as baixas resistividades aos teores anômalos de cloretos e as baixas cargas às argilas e areias saturadas por soluções salinas na área contaminada.

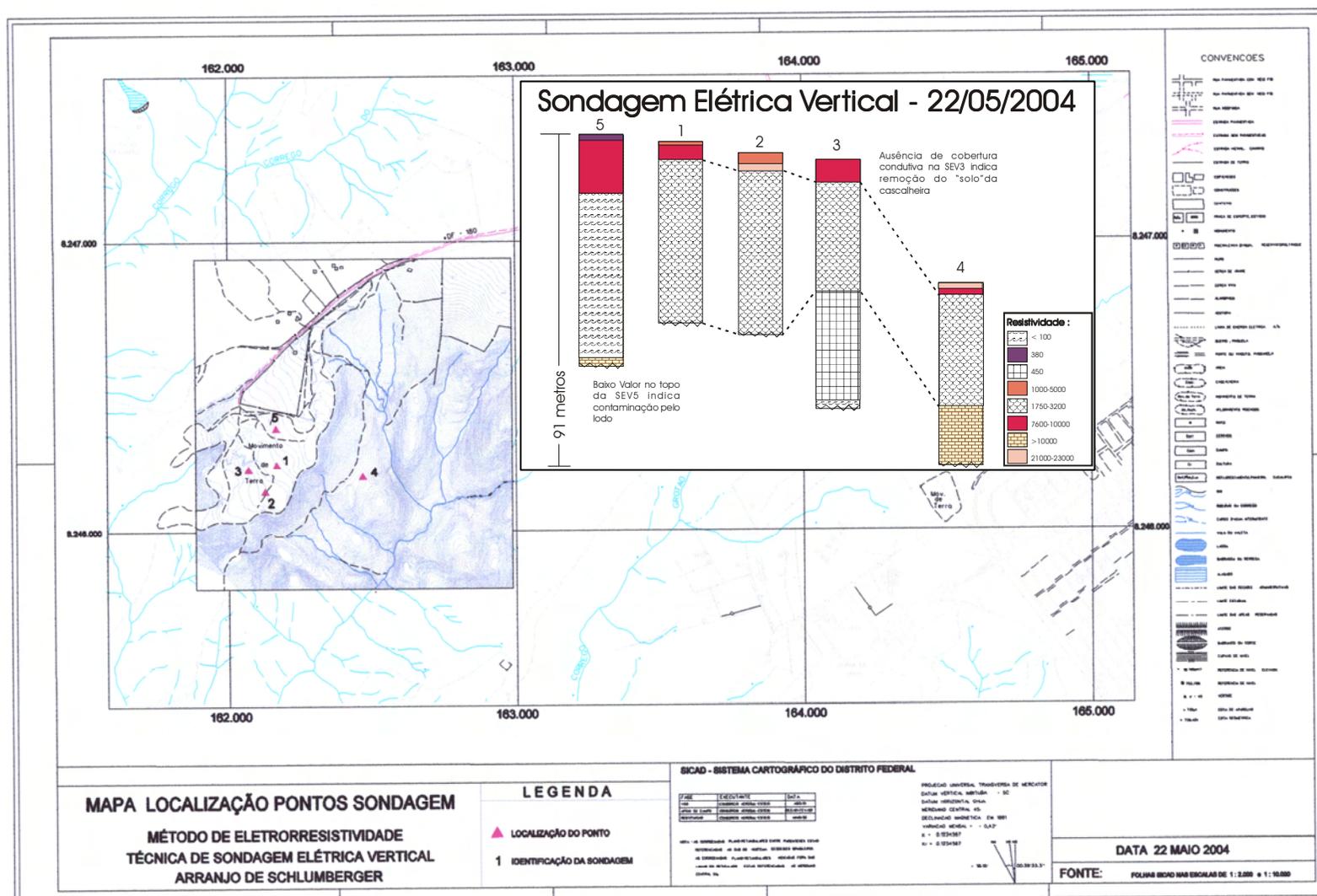
Em maio de 2004, uma turma de alunos de geologia da UnB, coordenada pelos Professores Doutores José Elói Guimarães Campos e Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento e pelo Geólogo



Alexandre Seidel, executaram cinco sondagens elétricas verticais na cascalheira (Figura 4.5). Como resultado, foi observado um alto contraste entre a resistividade do lodo químico com a laterita e o solo locais, possibilitando a realização de novos levantamentos em detalhe e, posteriormente, a perfuração de poços de investigação.

Com o sucesso do experimento foram realizados mais dois levantamentos geofísicos na cascalheira para a investigação da área de influência do lodo químico. Para tanto, foram utilizados dois equipamentos: um resistímetro modelo ER-300, fabricado pela Pergeo, que possibilita aplicar tensões de até 500 volts ao solo, foi utilizado como fonte de corrente contínua e um milivoltímetro fabricado pela Tectrol, que mede tensões entre 0 e 3000 mV, além de permitir a compensação do potencial natural do solo.

No primeiro levantamento, realizado nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2005, foi estabelecida uma malha retangular com 6x10 pontos espaçados por 50 metros (Figura 4.6), onde foi empregado o método de resistividade elétrica, com arranjo de *Wenner* e espaçamento dos eletrodos de um metro.



...Ricardo\1111Sondagem.dgn 22/06/2004 10:15:52

Figura 4.5 – Localização dos pontos e resultado das sondagens elétricas verticais no levantamento realizado pela turma de Graduação em Geologia da UnB.

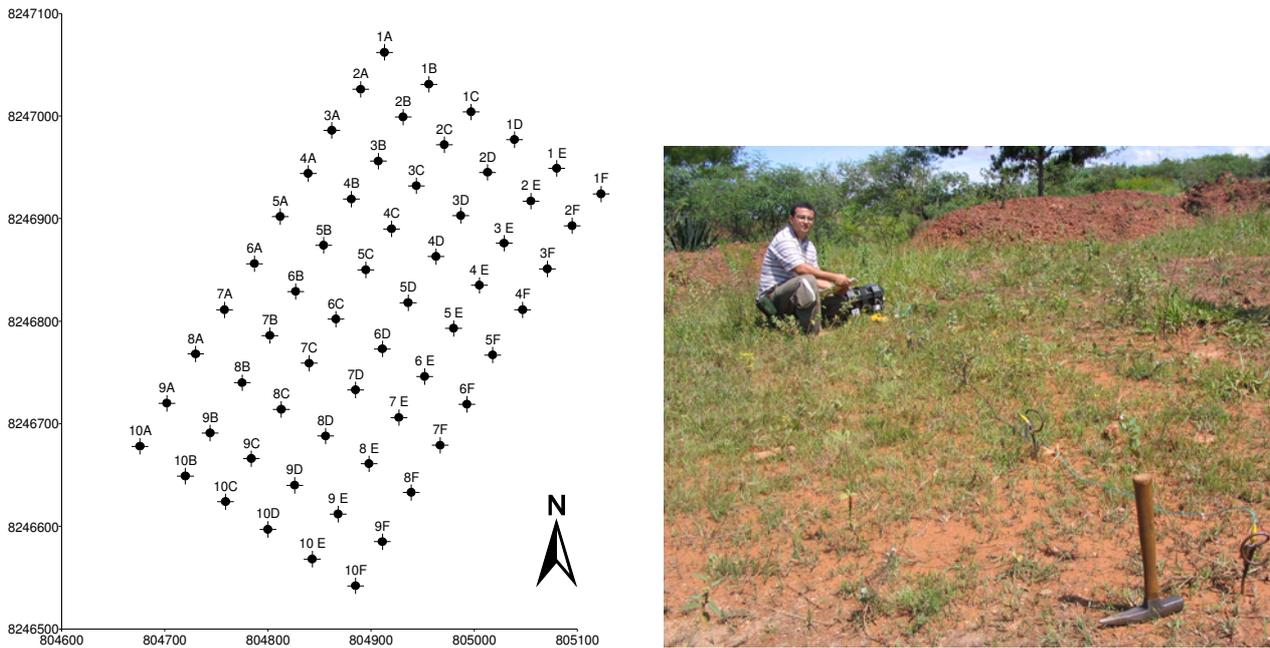


Figura 4.6 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo e dos ensaios geofísicos na cascalheira. Na foto, em detalhe, a disposição dos eletrodos no arranjo de *Wenner*. Datum: Astro Chuá.

No segundo levantamento, realizado em agosto de 2005, uma das linhas do estudo anterior foi escolhida e correspondia aos pontos 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D e 10D (Figuras 4.6 e 4.7). Neste caso, foi empregado o método de eletrorresistividade com o arranjo de *Schlumberger* para execução das sondagens elétricas verticais.



Figura 4.7 – Detalhe do equipamento utilizado para o ensaio geofísico, utilizando-se o arranjo de *Schlumberger*.



MÉTODOS GEOQUÍMICOS

Embora muito robusta, a investigação geofísica permite apenas mapear o avanço do efluente no subsolo. No entanto, o método geofísico não discrimina o Al dos demais íons investigados. Para resolver essa questão é necessária a complementação da informação por meio de estudos geoquímicos do processo.

As definições e conceitos listados neste tópico foram extraídos do livro “Geoquímica Ambiental e Estudos de Impacto” de autoria de Geraldo Mário Rohde (2004).

Um dos objetivos principais da Geoquímica Ambiental, em caráter empírico, é o de determinar a existência, a concentração, a especiação, a mobilidade potencial e a efetiva migração dos elementos e substâncias de origem antrópica dentro dos diversos compartimentos terrestres. Na prática, busca-se estabelecer mudanças ambientais químicas realizadas em escala ou contexto geológico pela intervenção humana.

No entanto, para que esse objetivo seja alcançado, alguns conceitos e definições de geoquímica ambiental são necessários. É de fundamental importância poder comparar os valores obtidos com os de referência, buscando-se diferenciar os dados obtidos da natureza, dos que incluem a influência humana.

A abundância normal de um elemento em um material, sem influência antrópica, é denominada “*background*”. E o *background* varia em função dos materiais, dos tipos de influências ambientais e de outras maneiras, correspondendo ao estado disperso de um elemento em um material amostrado, não atuando nenhum agente contaminante. No entanto, é sabidamente muito difícil, às vezes até mesmo impossível, obter materiais sem influência artificial, sem o contato antrópico ou antropogênico anterior. Sendo assim, recorre-se aos níveis de base, ou “*baseline*”, que nada mais são do que a concentração de um elemento ou substância em alguns pontos de amostragem no tempo e não correspondem necessariamente a um *background* verdadeiro, pois podem incluir a influência humana. Segundo Gough (1993 *apud* Rohde, 2004), nível de base é definido como o intervalo de dois desvios-padrão em relação à média, incluindo-se assim 95% do intervalo esperado para as concentrações.

Um elemento ou uma substância pode ser considerado contaminante ou anomalia, quando ocorre no ambiente em concentrações acima das consideradas como sendo os níveis de *background* ou *baseline*. Do ponto de vista ambiental, a anomalia significativa é aquela relacionada com a intervenção humana, quer seja direta ou indireta. As anomalias são consideradas não-significativas



quando originadas por processos naturais, tais como mineralizações ou outras concentrações, desde que não apresentem conseqüências do ponto de vista ambiental.

Halos de dispersão de um contaminante é a zona afetada pela sua ocorrência e mobilidade geoquímica.

Para a realização de estudos de mobilidade geoquímica algumas análises são fundamentais. Dentre os métodos, os de fracionamento da amostra fornecem dados da partição geoquímica existente para certo elemento e foram utilizados por muitos autores como Pinelli (1999), Bérubé & Brûlé (1999), Srinivasan & Viraraghavan (2002), Humez & Prost (1999) e Tack & Verloo (1999). Consistem em uma seqüência de técnicas de extração química seletiva, as quais incluem a remoção sucessiva ou dissolução de fases e seus metais associados.

Para o Al, considerado o elemento mais importante neste estudo, existem várias técnicas que podem ser utilizadas na sua detecção como: Fluorescência de Raios-X, Cromatografia Líquida, Polarografia, Análises Espectrofluorimétricas, Análise por Ativação de Nêutrons, ICP-MS, ICP-OES, Espectrometria Eletrotérmica de Absorção Atômica e Espectrofotometria UV-Vis.

Estudos de cinética de liberação de Al do lodo para o solo podem ser realizados para tentar prever a quantidade do elemento na suas formas realmente tóxicas ao ambiente. Esses estudos podem ser realizados utilizando-se uma metodologia similar à utilizada pelos pedólogos para o estudo de intemperismo de rochas. Várias simulações podem ser executadas, de forma a subsidiar o impacto causado pela atividade em questão.

O conhecimento de quais são as formas químicas estáveis num determinado conjunto de condições como pH, Eh, concentração, adsorção, CTC, teor de matéria orgânica, existência de sais dissolvidos, presença de cátions e ânions, clima, temperatura, é o ponto essencial para se compreender a mobilidade dos elementos contaminantes nos diversos compartimentos terrestres. A característica geoquímica fundamental das emissões antrópicas contaminantes é justamente o desequilíbrio químico, com a conseqüente existência de elementos nas fases móveis.

A avaliação preliminar do lodo disposto na cascalheira foi feita em abril de 2004. O objetivo foi o de caracterizar o LETA em diversas fases. Para tanto, cinco amostras foram coletadas sendo duas de lodos recentemente depositados, uma de LETA desidratado, uma de LETA desidratado antigo e já misturado ao laterito e uma última amostra de um material que estaria sendo carregado pela chuva (figura 4.8).



Figura 4.8 – Caracterização preliminar do lodo de estação de tratamento de água disposto na cascalheira. Pontos 1 e 2: lodos recentemente depositados na cascalheira; Ponto 3: lodo desidratado; Ponto 4: lodo desidratado antigo, misturado ao laterito e Ponto 5: material carregado pela chuva.

Nesta avaliação preliminar foram empregados os métodos de pipetagem (granulometria), potenciométrico (pH em água), gravimétrico (umidade, sólidos totais, sólidos suspensos fixos, sólidos suspensos voláteis), titulométrico (C orgânico e matéria orgânica), de espectrofotometria de absorção atômica com fonte eletrotérmica (Al), de espectrofotometria de emissão atômica (Na e K), de espectrofotometria UV/Vis (P e Fe), e de espectrofotometria de absorção atômica (Zn, Co, Li, Mn, Cu, Cd e Ni). Os resultados foram avaliados por classificação hierárquica e por correlação linear de *Pearson* e confirmados mediante a comparação com os resultados obtidos em amostra de referência NIST, *San Joaquin Soil*.

Os resultados mostraram que os valores elevados da fração areia poderiam estar sendo falseados pelo estado de agregação da argila, que forma grânulos de difícil separação. Esse fato pode ser comprovado pela forte correlação entre a areia e a matéria orgânica e fósforo, por exemplo. O Al não apresentou correlação significativa com nenhum outro parâmetro, provavelmente pelo excesso desse elemento frente aos demais, advindo da soma de contribuições naturais (bacia de drenagem) e antrópicas (coagulante). Os elementos menores foram melhor correlacionados as



frações finas do lodo. A amostra 4, que é mais antiga e sujeita por mais tempo ao intemperismo, apresentou redução de umidade e das concentrações de Na, Li e Ni (elementos de maior mobilidade), e aumento de matéria orgânica, P, Co, Mn e Fe, com relação as demais amostras.

As outras fases de análises seguiram as metodologias abaixo:

As análises químicas dos materiais foram realizadas, nas frações menores que 2mm, nos laboratórios da Companhia de Saneamento Ambiental do DF, CAESB, e do Instituto de Geociências, IG/UnB, compreendendo amostras de solo, do coagulante sulfato de alumínio e do lodo químico.

Para garantir a confiabilidade dos dados, amostras de referência geoquímicas foram e estão sendo analisadas nas mesmas baterias em que foram preparadas as amostras do estudo. Apenas os parâmetros com concentrações acima do limite de quantificação e com erro inferior a 10% relativo aos valores das amostras de referência, estão sendo aceitas na avaliação.

As determinações de Si, Al, Fe, Mg, Ca, Ti, Sr, Cu, Zn, Y, Be, Ba, Mn, Ce, La, Nd, Cr e V foram feitas nas amostras de coagulante, lodo e solo, coletadas em setembro de 2004, utilizando-se espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) da marca *Spectroanalytical Instrumental GmbH*, modelo *Spectroflame FVM03*, equipado com monocromador com rede holográfica de 2400 estrias/mm e policromadores no vácuo e no ar. Para tanto, as amostras foram preparadas por decomposição ácida HF/HNO₃/HClO₄/HCl ou fusão alcalina (Boaventura, 1991) ou por separação por troca iônica utilizando minicolunas (Oliveira & Boaventura, 1998), dependendo do analito. As análises por emissão atômica de Na e K foram processadas com espectrofotômetro de absorção atômica da marca GBC, modelo 932 AA. As concentrações de P foram determinadas pelo método do ácido ascórbico em aparelho do tipo espectrofotômetro UV/Vis Perkin-Elmer, modelo Lambda 25.

Já para as amostras de solo coletadas em junho de 2006, todas as determinações químicas descritas a seguir foram executadas conforme EMBRAPA (1997). O pH do solo foi determinado por medição eletroquímica da atividade dos íons H⁺ na solução do solo, utilizando-se eletrodo combinado imerso em suspensão solo:água na proporção 1:2,5. O carbono orgânico, CO, foi determinado pelo método Walkley & Black, que consiste na oxidação da matéria orgânica a CO₂ por via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, sendo o excesso de dicromato, após a oxidação, titulado com uma solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal. A matéria orgânica, MO, foi estimada como sendo 1,724xCO. A Capacidade de Troca de Cátions (CTC), definida como a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal prontamente disponível à



assimilação pelas plantas, foi obtida pela soma da acidez potencial com os metais extraíveis ($K^+ + Na^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$). O Al^{3+} trocável foi extraído com solução de KCl e determinado, volumetricamente, com uma solução diluída de NaOH, na presença de azul de bromotimol como indicador. O Na^+ e o K^+ trocáveis foram extraídos com solução Carolina do Norte ($HCl\ 0,05\ mol.L^{-1} + H_2SO_4\ 0,0125\ mol.L^{-1}$) e dosados por espectrofotometria de emissão atômica; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram extraídos com $KCl\ 1\ mol.L^{-1}$ e determinados por complexometria com EDTA; P, pela extração com solução de $HCl\ 0,05\ mol.L^{-1}$ e $H_2SO_4\ 0,025\ mol.L^{-1}$ (Mehlich-1) e determinação por colorimetria, utilizando-se ácido ascórbico como agente redutor; A Acidez Potencial ($H^+ + Al^{3+}$) é determinada pela extração do solo com acetato de cálcio $0,5\ mol.L^{-1}$ ajustado a pH 7,1 e titulação alcalimétrica do extrato; H^+ é calculado pela fórmula $[(H^+ + Al^{3+}) - Al^{3+}]$.

Ainda nas amostras de solo de junho de 2006, o procedimento de abertura das amostras por via úmida (Boaventura 1991) foi utilizado para as determinações de Si, Al, Fe, Ca, Ti, Sr, Cu, Zn, Y, Be, Ba, Co, Ni, Mn, Cr e V.

DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A Difratometria de Raios-X é uma promissora ferramenta para a identificação de óxidos e hidróxidos de Fe e/ou Al, bem como de outros minerais importantes para o mecanismo de sorção no solo.

Segundo Costa (2004), os colóides de Fe e de Al, em comparação com os argilominerais, tem menor poder de retenção para a água e muito menor adesividade, plasticidade e tenacidade. Podem, no entanto, exercer influência muito pronunciada sobre a agregação dos solos e mesmo determinar a cimentação irreversível (concrecionamento ou ligação em massas mais ou menos compactas). Possuem caráter anfótero, variando o ponto isoelétrico de uns para os outros. De acordo com a proporção relativa e o grau de cristalinidade que apresentam as formas cristalinas podem manifestar eletropositividade ou eletronegatividade. Exemplos de pontos isoelétricos: gibbsita (pH 4,8), goethita (pH 3,2) e hematita (pH 2,1).

A presença de Al no ambiente pode também influenciar na mineralogia da região, alterando ou afetando as características dos minerais. Substituições de Al nos óxidos de Fe e produtos intemperizados do solo são fenômenos comuns na natureza. O grau de substituição varia com as condições sobre a qual o intemperismo age no local. Óxidos de Fe / Al substituídos podem ser facilmente sintetizados no laboratório, portanto permitindo o estudo dos efeitos do Al nos diferentes



sistemas minerais. A presença de Al influencia a velocidade de formação, a forma dos óxidos e várias outras propriedades como tamanho do retículo cristalino, morfologia, comprimento das ligações, temperatura de dehidroxilação, vibração no infravermelho, campo magnético e velocidade de dissolução (Melfi & Carvalho, 1983).

Santos (2003), ao analisar a composição mineral dos sedimentos do Lago Descoberto por difratometria de Raios-X, notou que todas as amostras apresentaram picos de caolinita e gibbsita na fração argila. A autora interpretou essas presenças como sendo de minerais detríticos provenientes dos solos formados a partir das rochas do Grupo Paranoá.

Sendo assim, a difratometria de Raios-X pode ser utilizada nesse trabalho para a verificação de neoformação e imobilização do Al no solo.

A caracterização mineralógica dos perfis de intemperismo e de acumulação de materiais pode ser realizada por análises por Difração de Raios-X. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Raios X do Instituto de Geociências da UnB utilizando-se um aparelho Rigaku D-MAXB com radiação de $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$, intervalo de medida de $0,05^\circ$, sendo a varredura de 2 a $70^\circ 2\theta$. As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais são feitas no mesmo Laboratório, utilizando-se o *software* JADE 3.0 para *Windows*, *XRD Pattern Processing for the PC*, 1991-1995 *Materials Data, Inc.*

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Gonçalves *et al.* (1997) relata que as caracterizações químicas das amostras de lodo ensaiadas mostraram que a variação na qualidade da água bruta resultou em alterações significativas das propriedades químicas e físicas do lodo.

As análises de agrupamento consistem em estabelecer grupos naturais de objetos (formados a partir da distância ou similaridade entre eles) ou de descritores (estabelecidos pela dependência entre eles), de modo a reuní-los em um mesmo conjunto. Estes conjuntos mantêm uma relação hierárquica, combinando classes pequenas em classes cada vez maiores e menos homogêneas (Pielou, 1984 *apud* Farah, 2001). A classificação hierárquica foi então utilizada para agrupar os dados obtidos nas amostras de solo e de água, de acordo com o grau de “associação ou parentesco”. O método da Árvore Hierárquica, associado ao método de Ward, foi empregado adotando-se ainda a distância euclidiana e a normalização dos resultados por Z-Score. Esse método permitiu analisar



as amostras de forma genérica, avaliando-se todos os parâmetros ao mesmo tempo. Os resultados foram representados graficamente na forma de dendogramas.

Outras ferramentas foram então utilizadas para possibilitar uma melhor avaliação da influência do lodo químico na área de estudo. O Índice de Alteração Química, IAQ, (Choudhuri, 1997), foi obtido pela seguinte fórmula:

$$IAQ = \frac{[Al_2O_3]}{[Al_2O_3] + [CaO] + [Na_2O] + [K_2O]}$$

onde $[M_xO_y]$ representam a concentração dos analitos.

O teste não paramétrico de *Kolmogorov-Smirnov* foi utilizado para verificar a aderência à normalidade de cada parâmetro pertencente aos grupos obtidos após a classificação hierárquica. Se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* é estatisticamente significativo, rejeita-se a hipótese nula, na qual se estipula que os dados seguem a distribuição testada (Ferreira, 2000).

Os métodos estatísticos de estimação por triangulação foram utilizados para a elaboração das figuras de dispersão dos analitos na área de estudo. Para tanto, foi utilizado o software SURFER 6.04 da *GOLDEN SOFTWARE INC*. A orientação espacial da área está baseada nas informações do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD).



CAPÍTULO 5

USO DO LODO QUÍMICO, RICO EM ALUMÍNIO, PRODUZIDO PELA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA RIO DESCOBERTO PARA A RECUPERAÇÃO DE UMA ÁREA DEGRADADA.

Moreira, R.C.A.^{1,2}, Boaventura, G.R.³, Nascimento, C.T.C.³, Guimarães, E.M.³, Oliveira, R. P.³

¹Cia de Saneamento Ambiental do DF – CAESB, SAIN s/n ETA R1 laboratório B, CEP 72620-000, Brasília-DF, rcam@unb.br

²Curso de Pós-Graduação em Proc. de Dados em Geologia e Análise Ambiental, IG/UnB (doutorado)

³Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, CEP 70910900, grbunb@unb.br; carlostadeu@unb.br; rxedi@unb.br; rodolfoforpo@yahoo.com.br.

ABSTRACT: The final disposal of the alum sludge of the water treatment plant impacts on a gravel site in Ceilândia was evaluated with electrical resistivity method and three soundings. The chemical and mineralogical analyses were made and they showed that elements distribution on the soil subsurface is strongly associated to the granulometry and the mineral composition on soil profile. The plume was mapped and could be confirmed by the gibbsite and Mn presence. These results suggested that the alum sludge could be used for degraded areas recovering because the nutrients seem to be transferred to lower soil horizons, allowing the vegetation establishment.

Keywords: Alum sludge, solid reject, contamination of soil, ICP/OES.

RESUMO: O impacto da disposição final do lodo químico proveniente dos processos de tratamento de água na cascalheira situada em Ceilândia foi avaliado pelo método de resistividade elétrica e por três sondagens mistas. As análises químicas e mineralógicas foram realizadas e os resultados mostram que a distribuição dos elementos em subsuperfície está fortemente associada à granulometria e a composição mineral nos perfis de solo. A pluma de contaminação foi mapeada e pôde ser confirmada pela presença de gibbsita e Mn. O lodo químico pode ser usado para a recuperação de áreas degradadas, já que os nutrientes estão sendo transferidos para os horizontes mais profundos do solo local, permitindo a fixação da vegetação.

Palavras-chaves: Lodo de ETA, resíduos sólidos, contaminação de solo, ICP/OES.



INTRODUÇÃO

Nas estações de tratamento de água, ETA, a coagulação visa principalmente à retirada do material em suspensão. Este processo é habitualmente realizado por meio da adição de sais de ferro ou de alumínio, ou de polímeros sintéticos (Pavanelli, 2001).

O lodo químico produzido neste processo é um subproduto que não tem recebido, no Brasil, maiores cuidados com relação ao tratamento adequado para descarte (Bidone *et al.*, 1997; Di Bernardo *et al.*, 1999; Parsekian, 1998), sendo comum a sua disposição diretamente nos rios, lagos e reservatórios.

Bidone *et al* (1997) sugerem que o Al presente em altas concentrações no lodo químico pode ser imobilizado pela componente orgânica, que o adsorve formando complexos estáveis, pouco ou não solúveis.

Dentre os coagulantes utilizados no tratamento das águas dos mananciais do Distrito Federal destacam-se o hidroxiclreto de alumínio e o sulfato de alumínio.

Além do material coagulado, os filtros da ETA retêm também matéria orgânica. Esta, por sua vez, é constituída por plâncton, bem como por materiais particulados provenientes do solo carregado pela chuva como, por exemplo, excreta, restos vegetais e sementes.

Estudos anteriores do lodo da ETA-RD mostraram baixos valores de saturação de Al, que demonstram a não toxicidade deste elemento. O seu baixo valor nutricional inviabiliza o seu uso na agricultura. No entanto, a sua aplicação para a recuperação de áreas degradadas pode ser considerada viável (Moreira *et al.*, 2003). Para a disposição do lodo, foi então escolhida uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira), onde o solo já não mais existia, impossibilitando a fixação de vegetação.

O presente trabalho avalia a extensão da influência do Al no decorrer do tempo. Para tanto, foram realizados estudos geofísicos, geoquímicos e mineralógicos para a comparação do local de disposição do lodo com uma área adjacente ainda preservada.



DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA

De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Distrito Federal (Campos & Freitas-Silva, 1998), o local da cascalheira utilizada para a disposição do lodo situa-se sobre a Unidade R₄ do Grupo Paranoá, de idade Mesoproterozóica. A unidade R₄ é um metarritmito homogêneo com intercalações centimétricas regulares de metassiltitos argilosos, metapelitos e quartzitos finos que apresentam coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada em função dos diferentes graus de intemperismo. Couraças lateríticas ferruginosas, como as existentes ou já extraídas na área de disposição do lodo, ocorrem nas bordas das chapadas (altitude 1050-1150m), sobre as rochas da unidade R₄ do Grupo Paranoá. Os minerais predominantes, como hematita e caolinita, variam com o grau de intemperismo e, localmente com a tectônica (Martins, 2000).

O clima do Distrito Federal caracteriza-se por dois períodos distintos. O período seco estende-se de abril a setembro e caracteriza-se por baixas precipitações, alta taxa de evaporação e baixos valores de umidade relativa do ar, algumas vezes inferiores a 15%. O período chuvoso vai de outubro a março, com as maiores precipitações se concentrando entre os meses de novembro a janeiro. As temperaturas médias variam de um mínimo de 19°C nos meses de junho e julho até ápices de 22°C nos meses de março e setembro (Barbosa *et al*, 2003).

A área de estudo, situada na borda da chapada, tem declividade média de 3,5% em sua maior extensão. O tributário mais próximo é o Córrego do Meio, ou do Matadouro, situado à cerca de 500 metros no sentido sudeste, para o qual escoam toda a drenagem da cascalheira.

O perfil do solo original na cascalheira já não existe mais, devido à retirada da cobertura laterítica. O lodo é disposto diretamente sobre o regolito, definido como aquele material decomposto que repousa sobre a rocha-matriz, sem ter sofrido transporte.

Apesar de modificada em seu aspecto original, pode-se ainda identificar, feições de vegetação do tipo Campo Sujo e Campo Limpo, em áreas preservadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo compreende a comparação da superfície sobre a qual é disposto o lodo (cascalheira desativada) com outra adjacente preservada, através de levantamentos geofísicos, análises químicas e mineralógicas dos diversos materiais.

Na área de estudo foi realizado o levantamento geofísico para a investigação da área de influência do lodo químico. Para tanto, estabeleceu-se uma malha retangular com 6x10 pontos



espaçados por 50 metros, onde foi empregado o método de resistividade elétrica, com arranjo de Wenner e espaçamento dos eletrodos de 1 metro.

As amostras de solo foram coletadas na cascalheira e na área de controle, por meio de três sondagens mistas (rotativa e percussão), de 10 metros cada, sendo duas delas na área de influência (S1 e S2) e uma à área de controle (S3). A extração das amostras, coletadas metro a metro, foi feita com cravação de um amostrador padronizado de 34,9mm e 50,8mm de diâmetros, interno e externo, respectivamente (Topocard, 2004).

A caracterização mineralógica dos perfis de intemperismo e de acumulação de materiais foi realizada por análises por Difração de Raios-X. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Raios X do Instituto de Geociências da UnB utilizando-se um aparelho Rigaku D-MAXB com radiação de $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$, intervalo de medida de $0,05^\circ$, sendo a varredura de 2 a $70^\circ 2\theta$. As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais ocorreram no mesmo Laboratório, utilizou-se o *software* JADE 3.0 para *Windows*, *XRD Pattern Processing for the PC*, 1991-1995 *Materials Data, Inc.*

As análises químicas dos materiais foram realizadas nas frações menores que 2 mm, nos laboratórios da Companhia de Saneamento Ambiental do DF, CAESB, e do Instituto de Geociências, IG/UnB, compreendendo amostras de solo (30), do coagulante sulfato de alumínio (2) e do lodo químico (6) (Tabelas 5.1 e 5.2).

Para garantir a confiabilidade dos dados e avaliar as interferências causadas pelos elementos majoritários, a amostra de referência de solo *Sain Joaquin Soil* do “*National Institute of Standards and Technology – NIST*” foi analisada nas mesmas baterias em que foram preparadas as amostras do estudo. Nenhum parâmetro analisado, que apresentasse concentrações abaixo do limite de quantificação para cada elemento ou erros maiores que 10% em relação ao padrão de referência, foi considerado neste trabalho.

Todas as análises foram realizadas com o uso de água ultrapura (resistividade de $18,2 \text{ M}\Omega\text{cm}$) e reagentes Merck ou similares. O ácido nítrico foi purificado pelo processo de sub-ebulição em equipamento apropriado.

As determinações de Si, Al, Fe, Mg, Ca, Ti, Sr, Cu, Zn, Y, Be, Ba, Mn, Ce, La, Nd, Cr e V foram feitas utilizando-se espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) da marca *Spectroanalytical Instrumental GmbH*, modelo *Spectroflame FVM03*, equipado com monocromador com rede holográfica de 2400 estrias/mm e policromadores no vácuo e no ar. Para tanto, as amostras foram preparadas por decomposição ácida $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{HClO}_4/\text{HCl}$ ou



fusão alcalina (Boaventura, 1991) ou por separação por troca iônica utilizando minicolunas (Oliveira & Boaventura, 1998), dependendo do analito. O carbono orgânico, CO, foi determinado pelo método Walkley & Black e a matéria orgânica, MO, estimada como sendo $1,724 \times \text{CO}$ (Embrapa, 1997). As análises por emissão atômica de Na e K foram processadas com espectrofotômetro de absorção atômica da marca GBC, modelo 932 AA. As concentrações de P foram determinadas pelo método do ácido ascórbico em aparelho do tipo espectrofotômetro UV/Vis Perkin-Elmer, Lambda 25.

A classificação hierárquica foi utilizada para agrupar os dados obtidos nas amostras de solo, de acordo com o grau de “associação ou parentesco”. O método da Árvore Hierárquica, associado ao método de Ward, foi empregado adotando-se ainda a distância euclidiana e a normalização dos resultados por Z-Score.

Esse método permitiu analisar as amostras de forma genérica, avaliando-se todos os parâmetros ao mesmo tempo.

Outras ferramentas foram então utilizadas para possibilitar uma melhor avaliação da influência do lodo químico na área de estudo. O Índice de Alteração Química, IAQ (Choudhuri, 1997), foi obtido pela seguinte fórmula:

$$IAQ = \frac{[Al_2O_3]}{[Al_2O_3] + [CaO] + [Na_2O] + [K_2O]}$$

onde $[M_xO_y]$ representam a concentração dos analitos.

RESULTADOS

Pelo levantamento geofísico obteve-se o mapeamento da pluma do lodo químico em subsuperfície, para uma profundidade teórica de 50 cm (Fig. 5.1).

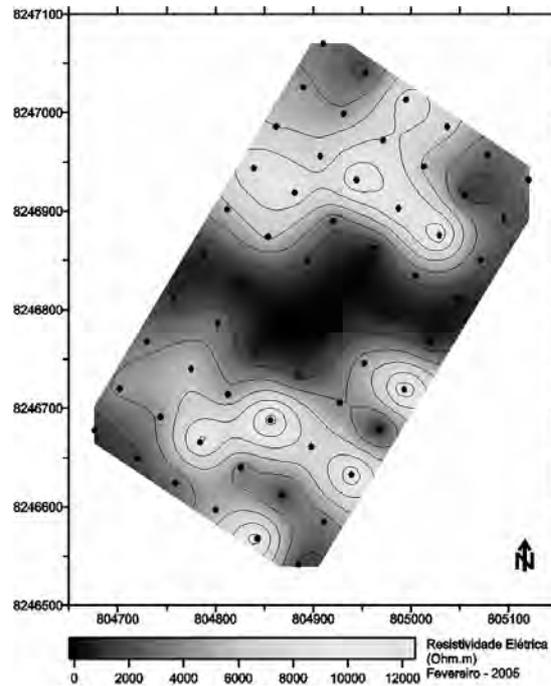


Figura 5.1. Levantamento Geofísico na cascalheira. A mancha escura central corresponde à pluma de lodo químico na área de estudo.

A maioria dos parâmetros analisados apresentou concentrações mais elevadas no topo e decréscimo ao longo do perfil, à exceção do Si (Tabelas 5.1 e 5.2).

Aplicando-se a classificação hierárquica pode-se observar em S1 a separação de dois níveis, sendo o primeiro correspondente aos 4 primeiros metros e o segundo aos outros seis metros. Ainda neste local pode-se considerar a amostra 5 como sendo de transição entre os dois níveis (Fig. 5.2).

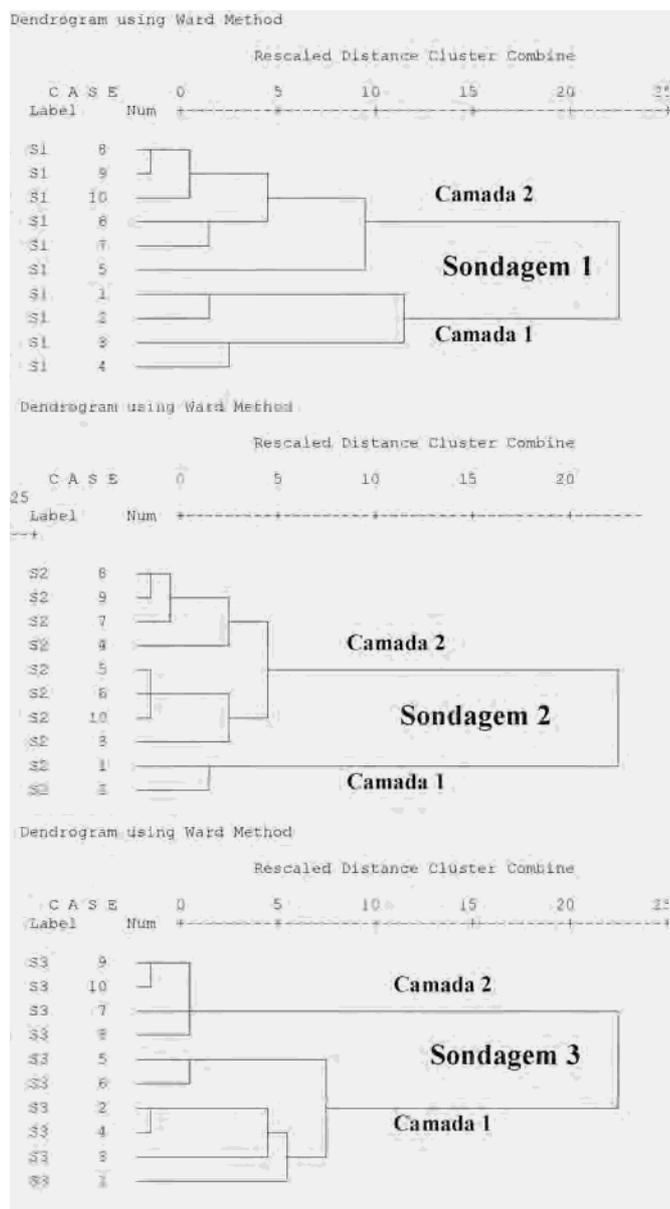


Figura 5.2. Dendrogramas correspondentes à classificação hierárquica dos pontos de sondagem S1, S2 e S3.

No segundo ponto de sondagem, S2, outros dois níveis foram separados (Fig. 5.2). O primeiro, correspondente as duas primeiras profundidades, pode ser considerado bem diferente do outro nível, formado pelas amostras entre 3 e 10m.

Para S3, o ponto de controle, novamente dois níveis foram determinados (Fig. 5.2). A exemplo do que ocorreu em S1, o primeiro nível compreende as quatro primeiras profundidades e o segundo se inicia em 5m. Neste caso podem se considerar as amostras coletadas à 5m e 6m, como sendo amostras de transição entre os níveis.



Os níveis e respectivas profundidades determinadas pelas classificações hierárquicas coincidem exatamente com os que foram determinados pelo laudo da sondagem (Topocart, 2004), com base nas características granulométricas. Pelo laudo os primeiros níveis correspondem às amostras com granulação mais fina, silte argilosas ou silte para argilosa. Os níveis mais profundos foram classificados como silte para arenosas e silte arenosas. Sendo assim, a distribuição vertical dos elementos está mais associada à variação da granulometria, consideradas as intercalações do Metarritimito R4, do que à influência do lodo químico em subsuperfície.

As análises por DRX de amostras extraídas a partir das perfurações mostram coerência entre as características mineralógicas, química e granulométrica (Tabela 5.1) dos três perfis estudados. Verifica-se que, nos três perfis de solo - S1, S2 e S3 (perfil de controle) - a caolinita é constituinte maior em todos os níveis, mas os demais minerais variam ao longo do perfil. Ao lado da caolinita, o quartzo é constituinte maior desde a base a 10 metros de profundidade, até 5, 4 e 7 metros, respectivamente, em S1, S2 e S3. A partir destas profundidades, a illita, torna-se constituinte maior, enquanto aparecem as reflexões da goethita, que aumentam em direção ao topo do perfil, sendo particularmente mais intensas no perfil S1.

A variação do conteúdo de quartzo e de illita ao longo do perfil do solo corresponde ao próprio litotipo da área - o metarritimito argiloso (R₄) – no qual se intercalam níveis arenosos e pelíticos. Por outro lado, a goethita corresponde ao que restou do (já explorado) nível laterítico formado pelo enriquecimento supergênico em ferro.

É importante notar que a gibbsita ocorre somente no primeiro metro de profundidade dos furos S1 e S2 (Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente), ou seja, dentro da área de disposição, mas não aparece no furo de controle S3 (Figura 5.5). A distribuição da gibbsita indica sua proveniência do próprio lodo já que está presente no material oriundo de ETA's (Fig. 5.6), ou pode ser resultado de cristalização após a deposição.

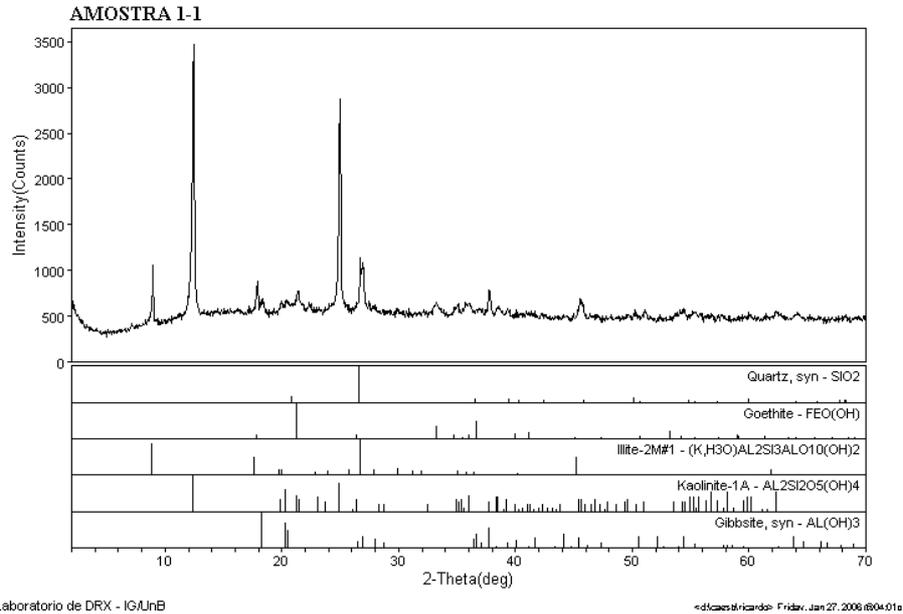


Figura 5.3 – Difratoograma de Raios-X para amostra S1-1metro. Notar a presença de gibbsita.

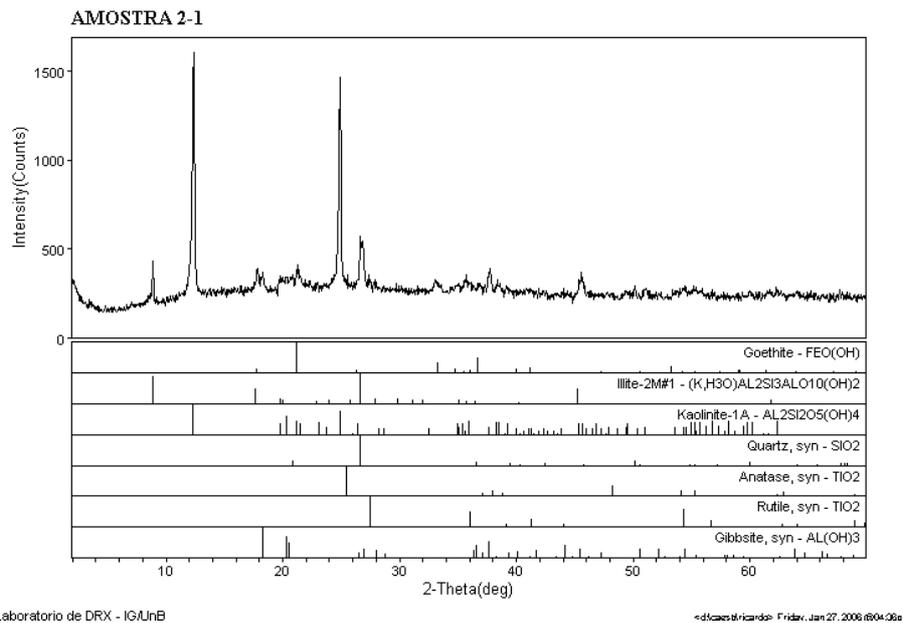


Figura 5.4 – Difratoograma de Raios-X para amostra S2 –1 metro. Notar a presença de gibbsita.

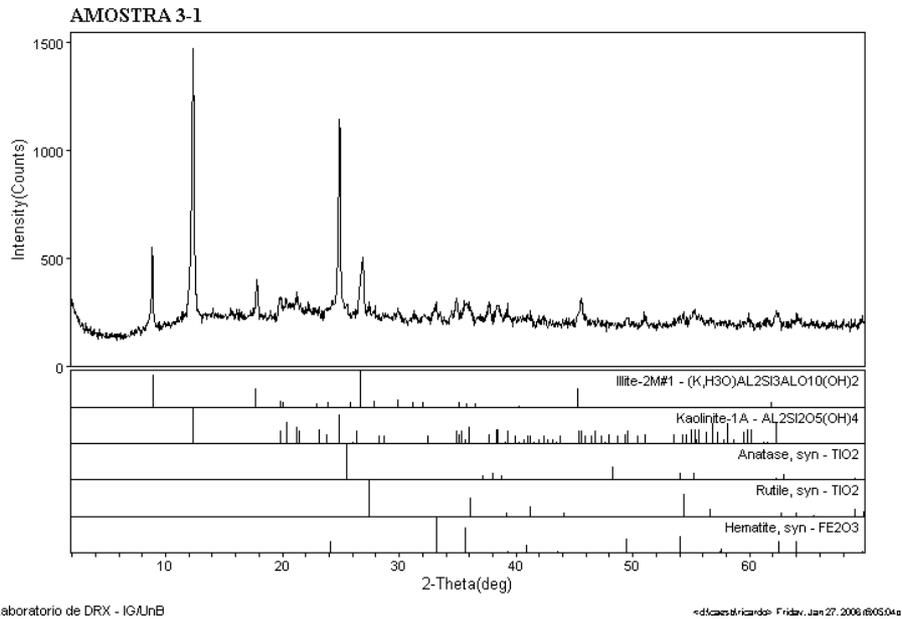


Figura 5.5 – Difratoograma de Raios-X para amostra S3 – 1metro. Notar a ausência de gibbsita.

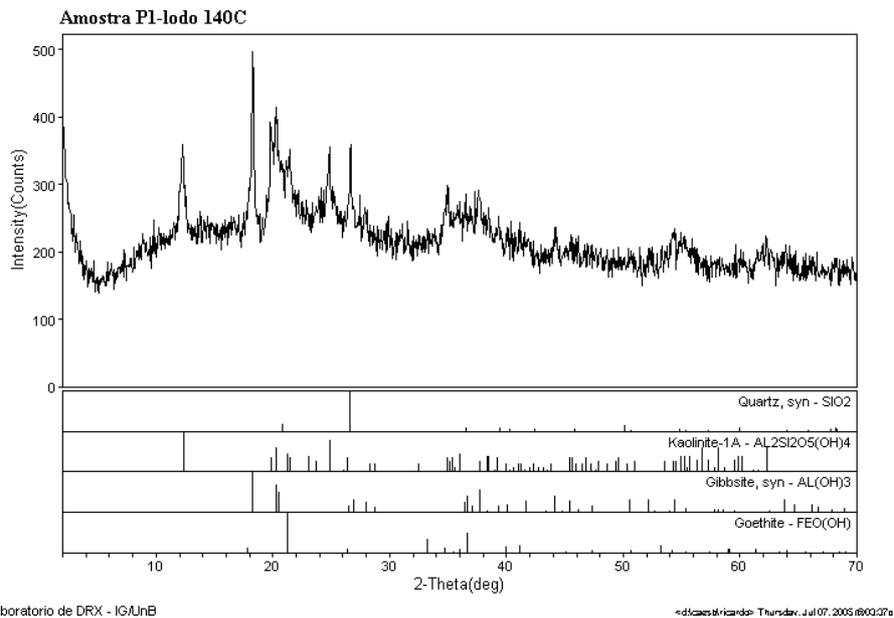


Figura 5.6 – Difratoograma de Raios-X para amostra de lodo de ETA Rio Descoberto. Notar os picos representando a gibbsita.

O conteúdo elevado de matéria orgânica e P no lodo é decorrente, direta ou indiretamente, do carregamento de material proveniente da bacia do Lago Descoberto, sendo que, uma das fontes é a deposição de plâncton nos filtros da ETA-RD (Figura 5.7).

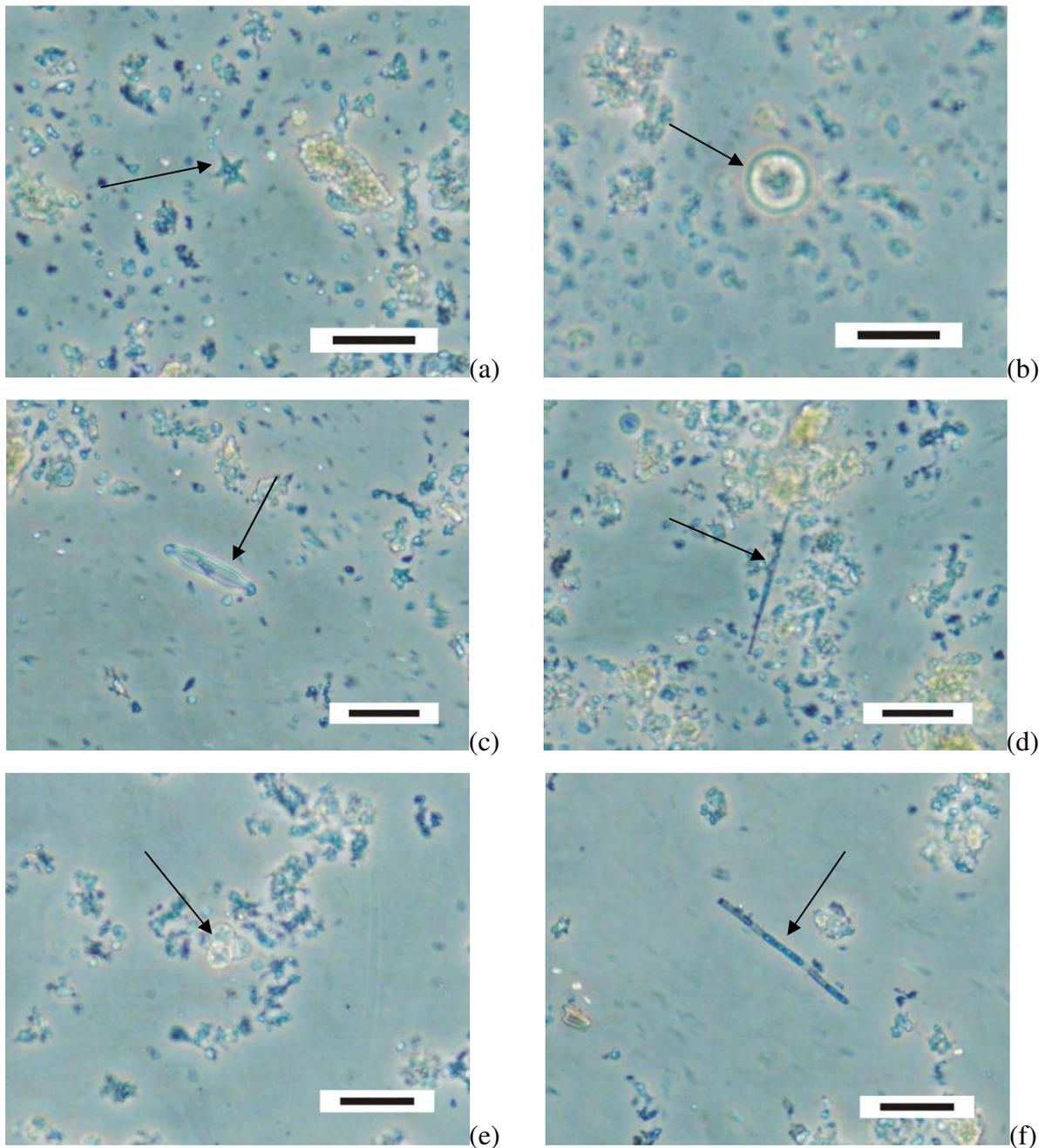


Figura 5.7 – Fotos de carapaças de fitoplâncton presentes no lodo da ETA Rio Descoberto. (a) *Tetraedron sp*; (b) *Cyclotella sp*; (c) *Pinnularia sp*; (d) *Synedra sp*; (e) *Coelastrum sp*, além de um exemplar ainda preservado de alga verde (f) *Glotila filamentosa*. Escala: barra igual a 25µm.

O lodo químico, contendo nutrientes, disposto acima da rocha alterada possibilita o desenvolvimento de vegetação na área degradada (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Vegetação desenvolvida no lodo químico.

Os índices de alteração química, IAQ, calculados para os materiais investigados mostram que a influência do lodo químico é mais fortemente sentida nos dois primeiros metros de S1, que em S2 e S3 (Tabela 5.1). Evidentemente isto se deve as diferenças entre as composições do lodo e do perfil de solo, assim como à localização de S1 exatamente num ponto de disposição do lodo químico. Isoladamente não seria possível estabelecer esta relação entre o lodo e os perfis se fossem analisadas apenas as concentrações de Al, uma vez que o solo é constituído predominantemente por argilominerais aluminosos.

O Mn apresentou teores apreciáveis no lodo químico, contrastando com os baixos teores observados em S3. Entretanto, nota-se que neste perfil, o maior valor de Mn está posicionado no mesmo nível de maior valor de Fe, indicando o processo pedogenético. Esta tendência de correlação Mn/Fe é também observada nos níveis mais superficiais dos perfis S1 (1 a 4 m) e S2 (1 e 2 m). Mas os valores significativamente altos de Mn, particularmente em S1 poderiam ser entendidos como evidências da dispersão geoquímica do material na área de estudo.

Por outro lado, a distribuição espacial do lodo químico na cascalheira pode ter provocado as anomalias não significativas negativas dos elementos Sr, Be, Y, Ba, La, Nd e Ce, em S1 e S2, pelo efeito de diluição. Esses elementos podem ser usados como normalizadores, principalmente porque os quatro últimos são associados geoquimicamente às lateritas (Licht, 1998).



CONCLUSÕES

A distribuição geoquímica dos elementos em subsuperfície está fortemente associada à variação da composição mineral e granulometria nos perfis de solo.

A influência da disposição do lodo químico rico em alumínio na área de empréstimo foi bem caracterizada pelo levantamento geofísico, utilizando-se o método da resistividade elétrica. Outros fatores como mineralogia, índice de alteração química, presença de matéria orgânica sobre o regolito e algumas análises químicas específicas, mostraram evidências da dispersão geoquímica do material na área de estudo. Do ponto de vista nutricional, o uso do lodo para a recuperação de áreas degradadas torna-se promissor ao se avaliar os teores de P e de matéria orgânica. Para estes parâmetros, os altos valores encontrados no lodo químico estão sendo transferidos para os horizontes mais profundos do solo, possibilitando o desenvolvimento da vegetação no local. Além disso, a matéria orgânica contribui para a imobilização do Al e, conseqüentemente, reduz a sua toxicidade para as plantas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq e a FINATEC pelo apoio em todas as etapas do estudo.



Pontos	Laudo	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	P (ppm)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CO (%)	MO (%)	IAQ	C	Q	I	Gt	Gb
S1 1		35,2	1,71	22,7	14,9	0,70	0,83	564,0	0,054	1,00	0,09	0,16	0,92	M	-	M	m	T
S1 2	SA	38,6	1,35	22,8	14,9	0,70	0,83	752,8	0,054	1,18	0,12	0,21	0,92	M	-	M	m	-
S1 3	SA	39,8	1,44	19,4	24,3	1,17	1,30	1152,0	0,056	1,59	0,05	0,08	0,87	M	T	M	m	-
S1 4	SA	36,5	1,16	17,5	30,0	1,11	1,33	1263,2	0,056	1,39	0,05	0,08	0,86	M	T	M	m	-
S1 5	S	66,6	1,30	14,2	4,65	4,16	6,10	863,5	0,042	0,70	0,05	0,09	-	M	M	m	T	-
S1 6	S	49,7	1,02	14,7	13,0	1,05	1,23	863,2	0,052	1,20	0,03	0,06	0,86	M	M	m	T	-
S1 7	S	65,3	1,24	16,5	8,07	2,18	2,75	421,4	0,051	1,12	0,04	0,07	0,81	M	M	m	-	-
S1 8	S	66,7	0,97	15,1	9,30	1,79	2,16	640,6	0,050	1,06	0,08	0,13	0,82	M	M	m	-	-
S1 9	S	62,7	0,95	14,5	7,94	2,20	2,72	586,4	0,049	1,11	0,05	0,08	0,79	M	M	m	-	-
S1 10	S	70,7	0,90	16,0	4,21	0,70	0,59	349,2	0,049	1,25	0,03	0,05	0,89	M	M	m	-	-
S2 1		29,7	1,29	22,7	13,0	3,06	4,03	676,2	0,052	1,00	2,17	3,75	0,82	M	-	M	T	T
S2 2	SA	35,9	1,33	20,9	12,5	0,89	0,83	679,5	0,056	1,45	0,08	0,14	0,90	M	-	M	T	-
S2 3	S	63,8	1,06	16,9	2,86	0,71	0,64	217,9	0,049	1,19	0,02	0,04	0,90	M	M	M	T	-
S2 4	S	85,4	0,58	8,7	3,18	0,43	0,36	173,1	0,036	0,52	0,08	0,13	0,90	M	M	M	T	-
S2 5	S	74,0	1,01	16,5	6,20	0,61	0,27	330,0	0,050	1,05	0,07	0,11	0,92	M	M	m	-	-
S2 6	S	71,3	0,98	17,2	6,14	0,61	0,56	310,9	0,046	1,02	0,07	0,12	0,91	M	M	m	-	-
S2 7	S	74,1	0,74	15,8	1,19	0,35	0,16	107,7	0,045	0,75	0,06	0,11	0,94	M	M	m	-	-
S2 8	S	77,8	0,77	12,6	3,25	0,42	0,22	176,7	0,046	0,97	0,07	0,12	0,91	M	M	m	-	-
S2 9	S	80,5	0,70	12,8	2,67	0,33	0,42	192,3	0,042	0,66	0,00	0,00	0,92	M	M	m	-	-
S2 10	S	80,7	0,83	15,2	3,82	0,59	0,51	166,4	0,048	1,03	0,11	0,18	0,91	M	M	m	-	-
S3 1		39,4	1,51	25,2	16,1	2,99	3,87	709,1	0,062	1,82	0,06	0,11	0,81	M	-	M	T	-
S3 2	SA	45,8	1,62	23,1	13,4	1,09	0,81	519,4	0,063	1,99	0,04	0,08	0,89	M	-	M	m	-
S3 3	SA	45,0	1,39	20,3	19,7	0,85	0,53	475,2	0,056	1,40	0,01	0,02	0,91	M	T	M	m	-
S3 4	SA	52,2	1,50	23,6	10,3	0,92	0,44	560,5	0,059	1,75	0,02	0,03	0,91	M	T	M	T	-
S3 5	S	52,7	1,29	23,3	6,57	0,82	0,43	264,8	0,062	1,75	0,01	0,01	0,91	M	T	M	T	-
S3 6	S	57,2	1,26	20,1	7,27	0,95	0,72	310,0	0,057	1,49	0,00	0,00	0,90	M	T	M	-	-
S3 7	S	58,1	0,77	11,0	3,48	1,75	2,33	240,5	0,048	1,09	0,00	0,00	0,76	M	M	m	-	-
S3 8	S	62,1	0,94	14,5	6,19	1,14	1,03	210,4	0,056	1,41	0,03	0,06	0,85	M	M	m	-	-
S3 9	S	65,8	0,81	13,3	3,37	1,64	1,94	142,7	0,050	1,18	0,01	0,01	0,81	M	M	m	-	-
S3 10	S	63,6	0,82	14,4	2,53	0,97	1,08	102,2	0,051	1,06	0,08	0,13	0,87	M	M	m	-	-
Lodo (n=6)		30,8	1,18	34,9	11,0	1,02	1,21	1226,2	0,066	0,540	3,6	6,2	0,96					

Tabela 5.1. Resultados das análises químicas nas amostras de solo e lodo químico, bem como do Índice de Alteração Química (IAQ). Pela Topocart (2004), SA corresponde a silte p/ argiloso e S a silte p/ arenoso. Os resultados correspondem as massas secas das amostras.

C: caolinita; Q: quartzo; I: illita; Gt: goethita; Gb: gibbsita. Constituintes: M=maior; m=menor; T=traço.



Amostras	Sr ppm	Cu ppm	Zn ppm	Y ppm	Be ppm	Ba ppm	Mn ppm	V ppm	Cr ppm	La ppm	Nd ppm	Ce ppm
S1 1	97,6	23,3	36,6	32,4	1,65	237	131	348	201	101,98	25,33	141,41
S1 2	70,3	22,7	43,4	25,3	1,72	215	187	239	117	75,79	18,35	89,62
S1 3	71,1	37,7	70,5	29,4	2,50	245	340	289	161	23,97	7,29	32,77
S1 4	53,1	53,6	76,4	28,0	2,57	244	225	347	264	21,39	9,47	30,37
S1 5	69,2	20,0	5,83	35,2	1,04	120	030	133	55,8	52,96	21,24	71,92
S1 6	45,7	21,7	58,4	30,1	2,05	188	265	179	75,2	11,52	6,39	13,12
S1 7	49,4	17,7	31,0	37,2	1,88	176	107	175	65,8	20,74	11,08	20,44
S1 8	40,7	21,4	38,7	22,4	1,59	167	117	156	69,2	38,83	15,03	39,22
S1 9	54,8	25,4	35,0	26,4	1,74	203	169	155	58,4	43,04	13,69	42,39
S1 10	33,2	15,1	13,2	22,9	1,49	198	065	115	50,9	29,99	12,55	22,68
S2 1	92,0	27,7	48,1	30,7	1,76	244	176	393	224	41,76	9,93	91,74
S2 2	95,8	29,9	52,3	33,1	2,10	277	138	340	198	50,89	11,25	68,03
S2 3	66,1	11,5	14,4	29,9	1,47	195	050	158	116	53,96	10,95	63,66
S2 4	17,6	6,51	8,78	15,2	0,88	72,5	040	68,1	33,6	9,04	0,87	13,37
S2 5	44,8	13,1	22,9	21,4	1,19	161	085	130	52,0	18,53	4,65	23,24
S2 6	30,0	11,0	6,56	18,8	1,29	159	052	176	108	12,78	3,40	19,32
S2 7	41,0	4,83	0,68	16,8	0,81	158	016	73,2	51,8	55,47	17,66	56,00
S2 8	34,0	8,03	7,73	20,9	1,07	162	040	107	47,5	32,93	13,28	33,89
S2 9	29,6	9,44	7,46	21,5	0,91	115	057	87,9	40,8	29,92	12,29	28,34
S2 10	27,8	8,29	9,43	19,0	1,37	161	064	103	59,8	14,69	7,48	17,16
S3 1	88,4	24,3	43,9	36,2	2,32	296	059	371	209	125,33	21,56	143,23
S3 2	73,0	18,5	47,9	38,9	2,43	301	080	302	155	59,90	9,82	65,11
S3 3	73,6	31,0	109	33,8	2,47	240	139	250	120	100,79	20,88	108,17
S3 4	60,6	22,0	38,9	36,5	2,45	289	084	257	136	64,43	18,45	78,28
S3 5	57,5	8,74	18,8	31,5	2,15	284	051	186	85,6	87,24	17,32	109,12
S3 6	56,0	9,05	13,9	23,7	1,46	282	037	171	77,5	84,73	3,54	66,48
S3 7	8,70	4,99	9,63	26,1	1,14	224	038	125	43,2	32,53	8,41	58,67
S3 8	15,9	13,2	11,3	21,6	1,32	278	040	131	62,3	49,97	23,81	54,75
S3 9	6,38	5,49	3,50	21,5	1,11	187	046	106	39,9	38,56	19,78	45,29
S3 10	8,17	1,26	0,72	22,4	1,03	158	024	84,9	38,8	39,20	18,58	41,61
Lodo (n=6)	5,34	23,9	34,6	2,11	0,96	24,1	200	187	85,8	1,65	2,05	21,13
Al ₂ (SO ₄) ₃ (n=2)	4,14	0,28	19,6	1,33	0,44	0,61	700	97,6	1,1	0,60	0,75	108,7

Tabela 5.2 – Resultados das análises de elementos químicos nas amostras de solo, lodo químico e coagulante. Os resultados estão expressos em partes por milhão, ppm, para as massas secas das amostras.



CAPÍTULO 6

ESTUDO GEOQUÍMICO DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ETA EM ÁREA DEGRADADA

**Ricardo Cosme Arraes Moreira^{*}, Edi Mendes Guimarães, Geraldo Resende Boaventura,
José Elói Guimarães Campos.**

Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, CEP
70910-900, Brasília,DF.

Alessandra Morales Momesso, Gilmar Lopes de Lima

Companhia de Saneamento Ambiental do DF, SAIN S/N, ETA CAESB, 70620-000, Brasília,
DF.

GEOCHEMISTRY OF THE FINAL DISPOSAL OF THE WATER TREATMENT RESIDUALS ON DEGRADED AREA

The aim of this survey was to determine the physical and chemical properties of the gravel place where urban antropogenic sludge from Rio Descoberto's Water Treatment Plant is already disposed. Physical, chemical and biological analysis of the soil samples (n=54), sludge samples from the water treatment plant (n=2), chemical coagulant (n=20) and samples from superficial waters (n=9) and water table (n=60) were performed. As major results we can emphasize that the horizontal distribution of mineral phases like gibbsite, organic material, exchanged Ca, available Mn and P on the soils under the waste deposition are evidently originated from the sludge. The immobilization of Al and Pb in the soils layer was considered as a positive point for the rehabilitation of degraded areas. Some of these mobile elements witch are taken up by the plants could stimulate the growing of the vegetation on this substrate but, on the other hand, they could contaminate the water table.

Keywords: sludge from water treatment plant; degraded areas; environmental geochemistry.



INTRODUÇÃO

O lodo químico produzido pelas Estações de Tratamento de Água, LETA, é um resíduo gerado no processo de tratamento da água, principalmente nas etapas de decantação e lavagem dos filtros. Trata-se de um material extremamente gelatinoso, composto por hidróxidos de alumínio, partículas inorgânicas como argila e silte, colóides de cor e microrganismos, incluindo plâncton, além de outros materiais orgânicos e inorgânicos, que são removidos da água tratada, ou ainda provenientes dos produtos químicos adicionados ao processo (Andreoli, 2001; Moreira *et al*, 2007). Seu pH varia de 5 a 7, sendo insolúvel na faixa natural de pH da água.

Estima-se que no Brasil sejam despejadas 2.000 toneladas/dia de LETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento (Cordeiro *in* Reali, 1999). Essa prática pode contribuir para o consumo de oxigênio dissolvido no curso d'água, levando a condições anaeróbias, com produção de odores, crescimento excessivo de algas e mortandade de peixes (Machado *et al*, 2005). Alguns estudos mostraram a toxicidade crônica desse material para os organismos aquáticos, assim como a degradação da qualidade da água e dos sedimentos (Barbosa *et al*, 2000; Sotero-Santos *et al*, 2005).

No entanto, dada a crescente preocupação com os aspectos negativos que a disposição inadequada do LETA possa trazer ao meio ambiente, outras práticas têm sido adotadas. Dentre elas, a utilização como insumo agrícola (Machado *et al*, 2005; Hyde & Morris, 2000), a recuperação de áreas degradadas (Moreira *et al*, 2007, Machado *et al*, 2005; Lenzi *et al*, 2005; Teixeira *et al*, 2005), a co-disposição em aterros sanitários (Andreoli, 2001, Di Bernardo *et al*, 2002; Guerra & Angelis, 2005), a reciclagem de resíduos da construção civil (Hoppen *et al*, 2005), o uso como coagulante para estações de tratamento de esgotos (Silva, 2003), a regeneração do coagulante (Gonçalves *et al*, 1999), entre outras.

As características do LETA o tornam mais similar ao solo que os lodos de esgotos (AWWA, 1995). Neste caso, o nitrogênio e a matéria orgânica contida no LETA são, em geral, mais estáveis, menos reativos e em menores concentrações.

Na Estação de Tratamento da Água Rio Descoberto, ETA-RD, o lodo proveniente da lavagem dos filtros é centrifugado e encaminhado para a cascalheira desativada, desde março de 1997, para ser utilizado na recuperação daquela área degradada (Barbosa, 1997). A ETA-RD tem capacidade nominal para 6.000 L/s, utiliza o coagulante sulfato de alumínio férrico



no tratamento da água do Lago Descoberto e trabalha com um alto índice de automatização dos seus processos. A produção anual de LETA desta estação ultrapassa 2.000 toneladas.

O uso de cascalheiras para a disposição final do lodo é uma prática adotada no Distrito Federal, mas ainda são poucos os estudos que atestem sobre os riscos que os componentes desse material possam trazer a essas áreas mineradas.

Neste trabalho procurou-se estabelecer os efeitos da disposição do LETA em uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira) e suas conseqüências no solo, na água superficial e subterrânea. Para tanto, pretendeu-se determinar a existência, a concentração e a mobilidade dos elementos e compostos químicos de origem antrópica, por meio de estudos mineralógicos e geoquímicos pela comparação do local de disposição do LETA com outras áreas adjacentes.

ÁREA DE ESTUDO

O clima do Distrito Federal caracteriza-se por dois períodos distintos. O período seco se estende de maio a setembro e caracteriza-se por baixas precipitações, alta taxa de evaporação e baixos valores de umidade relativa do ar, algumas vezes inferiores a 15%. O período chuvoso, de outubro a abril, teve o índice pluviométrico de 1450 mm (out/07 a abr/08, Estação ETE Melchior. Fonte: PHIHM/CAESB). As temperaturas médias variam de um mínimo de 19°C nos meses de junho e julho até ápices de 22°C nos meses de março e setembro (Barbosa *et al*, 2003).

A área de estudo, que corresponde a uma cascalheira desativada, está localizada nas proximidades da cidade de Ceilândia-DF (Figura 6.1). Nesta área, o resíduo do tratamento da água do Lago Descoberto está sendo disposto diretamente sobre o regolito exposto após a extração da crosta laterítica. Constituem as chamadas “cascalheiras”, couraças lateríticas ferruginosas, que ocorrem nas bordas das chapadas (altitude 1050-1150m). A cascalheira utilizada, de acordo com o Mapa Geológico do DF, está posicionada sobre a Unidade R4 do Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozóica (Campos & Freitas-Silva, 1998). A Unidade R4 é um metarritmito homogêneo formado por intercalações centimétricas regulares de metassiltitos argilosos, metapelitos e quartzitos finos que apresentam coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada em função dos diferentes condições de intemperismo.

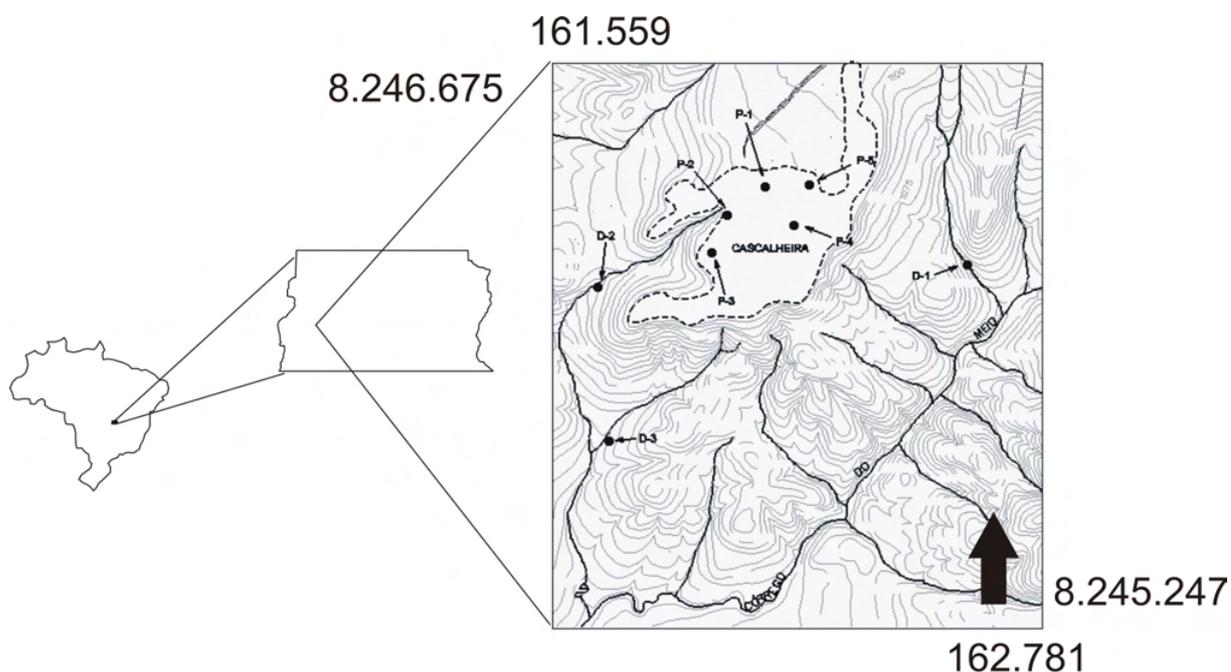


Figura 6.1 – Localização da área de estudo. Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator-UTM / SICAD).

A área de disposição do LETA corresponde a um platô com cerca de 75.000 m², com declividade média de 3,5% em sua maior extensão (NE-SW). As linhas de drenagem têm preferencialmente o sentido sudeste, desembocando a cerca de 500 metros no Córrego do Meio, ou Matadouro.

A profundidade da superfície freática é superior a 10 m em toda a área de estudo. Foram encontrados dois poços na região, sendo um poço profundo à jusante da área e um poço raso à montante (cisterna). Embora ambos estejam desativados, a cisterna está sendo utilizada como fossa séptica.

O local de disposição do LETA é circundado por estradas de acesso e pequenas propriedades rurais, ocorrendo áreas degradadas com baixo índice de revegetação. É hábito da comunidade local, a utilização de voçorocas e ravinas como lixões, o que facilita o transporte de contaminantes do lixo para o lençol freático e drenagens.

MÉTODOS E TÉCNICAS

Amostragem

As amostras de solo foram coletadas na cascalheira propriamente dita e na área à montante, onde o cerrado é preservado. Na cascalheira duas áreas merecem destaque: uma onde houve a disposição de LETA e outra onde não houve.



A amostragem foi realizada por trado padrão AMS, construído com liga especial de aço carbono e extremidade em vídia de tungstênio. Em junho de 2006, 54 amostras foram extraídas do intervalo entre 10 e 20 cm de profundidade, segundo a malha regular de 50 metros. Esta malha é formada por 9 e 6 linhas ortogonais, nomeadas, respectivamente, de A até F com direção (NW-SE) e de 2 a 10 (Figura 6.2). Os pontos foram escolhidos no escritório e localizados em campo com GPS, da marca Garmin, modelo 45XL.

Após a coleta, as amostras foram quarteadas, sendo retiradas alíquotas para as diversas análises. Posteriormente, a fração de interesse referente a granulometria menor igual a 2 mm foi separada, constituindo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Para a avaliação da qualidade da água na área impactada, foram obtidas amostras de superfície em drenagens e de água subterrânea por meio de poços de monitoramento (Figura 6.1). Cinco poços foram perfurados em setembro e outubro de 2006. Para tanto, foi utilizada a sondagem por percussão com jato d'água. A água foi encontrada na camada correspondente ao metarritmito fresco nas profundidades de 25, 25, 21, 27 e 31 metros para os poços P1, P2, P3, P4 e P5, respectivamente.

As amostras das drenagens próximas a área da cascalheira foram coletadas em três oportunidades durante o período de chuvas, à aproximadamente 30 cm de profundidade (CETESB, 1988). O período chuvoso foi escolhido devido ao caráter intermitente ou efêmero de D2 e D3, que são as drenagens mais importantes para a avaliação ambiental.

As águas subterrâneas foram coletadas mensalmente, de janeiro a dezembro de 2007, com o auxílio de amostradores de polietileno para cada poço. O nível estático do poço foi medido antes da coleta das amostras de água. O branco de amostragem foi retirado para verificar se houveram contaminações do material de coleta.

Os parâmetros pH, temperatura da água, condutividade e sólidos dissolvidos totais (SDT) foram medidos no campo.

As amostras de águas superficiais e subterrâneas foram acondicionadas sob refrigeração em frascos de polietileno (para análises físicas e químicas), de polietileno contendo 1,5mL de HNO₃/L (para análises de elementos traço) e em frascos esterilizados de vidro (para análise bacteriológica). O tempo entre a primeira coleta e o início das análises no laboratório foi sempre inferior a 4 horas.

No laboratório foram analisadas turbidez, Cl⁻, K, Na, Al, Ca, nitrogênio de nitratos (NO₃⁻), nitrogênio de nitritos (NO₂⁻), nitrogênio amoniacal, CO₂ livre, SO₄²⁻, Se, Hg, Sb, Pb,



Ag, Mg, Fe, As, Ni, Cd, Cu, Cr, Mn, Ba, Co, Zn, Li, P, HCO_3^- , CO_3^{2-} , alcalinidade total, dureza total, oxigênio consumido, F^- , coliformes totais e coliformes termotolerantes das amostras (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

Análises químicas

As análises químicas descritas a seguir foram executadas conforme EMBRAPA (1997). O pH do solo foi determinado por medição eletroquímica da atividade dos íons H^+ na solução do solo, utilizando-se eletrodo combinado imerso em suspensão solo:água na proporção 1:2,5. O carbono orgânico, COrg , foi determinado pelo método *Walkley & Black*, que consiste na oxidação da matéria orgânica a CO_2 por via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, sendo o excesso de dicromato, após a oxidação, titulado com uma solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal. A matéria orgânica, MO , foi estimada como sendo $1,724 \times \text{COrg}$. A Capacidade de Troca de Cátions (CTC), definida como a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal prontamente disponível à assimilação pelas plantas, foi obtida pela soma da acidez potencial com os metais extraíveis ($\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). O Al^{3+} trocável foi extraído com solução de KCl e determinado, volumetricamente, com uma solução diluída de NaOH , na presença de azul de bromotimol como indicador. O Na^+ e o K^+ trocáveis foram extraídos com solução Carolina do Norte (HCl $0,05\text{mol.L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $0,0125\text{mol.L}^{-1}$) e dosados por espectrofotometria de emissão atômica; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram extraídos com KCl 1mol.L^{-1} e determinados por complexometria com EDTA ; P, Pb, Zn, Cu e Mn disponíveis foram extraídos com solução de HCl $0,05\text{mol.L}^{-1}$ e H_2SO_4 $0,025\text{mol.L}^{-1}$ (Mehlich-1), sendo P determinado por colorimetria, utilizando-se ácido ascórbico como agente redutor e os demais elementos por espectrofotometria de absorção atômica, com chama ou fonte eletrotérmica. A Acidez Potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) é determinada pela extração do solo com acetato de cálcio $0,5\text{mol.L}^{-1}$ ajustado a pH 7,1 e titulação alcalimétrica do extrato; H^+ é calculado pela fórmula $[(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) - \text{Al}^{3+}]$. As determinações das concentrações de Si, Al, Fe, Ca, Ti, Sr, Cu, Zn, Y, Be, Ba, Co, Ni, Mn, Cr e V foram feitas utilizando-se espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) da marca *Spectroanalytical Instrumental GmbH*, modelo *Spectroflame FVM03*, equipado com monocromador com rede holográfica de 2400 estrias/mm e policromadores no vácuo e no ar. Para tanto, as amostras foram preparadas por decomposição ácida $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{HClO}_4/\text{HCl}$ ou fusão alcalina, dependendo do analito (Boaventura, 1991). As análises por espectrometria de absorção atômica com fonte eletrotérmica para o elemento Pb

foram processadas com forno de grafite da marca GBC, modelo GF 3000, acoplado ao espectrofotômetro de absorção atômica da marca GBC, modelo 932 AA.

Outras duas amostras de lodo químico da ETA-RD e vinte do coagulante sulfato de alumínio férrico utilizado no tratamento da água foram analisadas para Cu, Mn, Pb e Zn disponíveis. O objetivo foi avaliar se havia ou não contribuição desses materiais como fonte desses elementos para o solo investigado.

Todas as análises químicas foram realizadas com o uso de água de alta pureza (resistividade de 18,2 MΩcm) e reagentes de grau analítico. O ácido nítrico foi purificado pelo processo de sub-ebulição em destilador de quartzo MARCONI, modelo MA-075.

Para garantir a confiabilidade dos dados e avaliar as possíveis interferências foi utilizada a amostra de referência de solo 2709 - *Sain Joaquin Soil* do “*National Institute of Standards and Technology – NIST*”. Não foi considerado nenhum resultado em que o parâmetro analisado apresentasse concentrações abaixo do limite de quantificação para cada elemento ou erros maiores que 10% em relação a amostra de referência (Tabela 6.1).

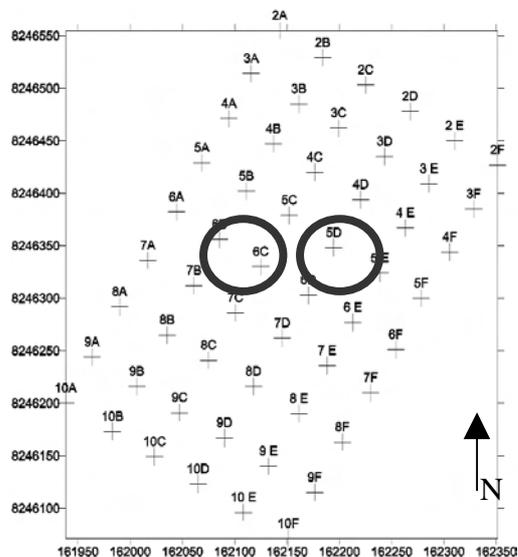


Figura 6.2 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na cascalheira. Os círculos pretos mostram as principais áreas de disposição do LETA. Coordenadas do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (Universal Transversa de Mercator-UTM / SICAD).

Análise mineralógica

A caracterização mineralógica dos perfis de intemperismo e do lodo acumulado foi realizada em 23 amostras escolhidas aleatoriamente. A composição mineral foi definida por análises por Difração de Raios-X. Após quarteadas as amostras foram peneiradas, sendo



analisada a fração inferior a 0,4mm, colocada – pela técnica de *backloading* – em lâmina de alumínio vazada.

As análises foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X, do Instituto de Geociências/UnB. O aparelho usado foi o difratômetro Rigaku D-MAXB com radiação de $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$, intervalo de medida de 0,050, sendo a varredura de 2 a $70^\circ 2\theta$. As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais foram feitas com o *software* JADE 3.0 para *Windows*, *XRD Pattern Processing for the PC*, 1991-1995 *Materials Data, Inc.*

Análise dos dados

A análise estatística multivariada por classificação hierárquica foi utilizada para agrupar os dados obtidos nas amostras de solo e água, de acordo com o grau de “associação ou parentesco”. O método da Árvore Hierárquica, associado ao método de *Ward*, foi empregado adotando-se ainda a distância euclidiana e a normalização dos resultados por *Z-Score*. Esse método permitiu analisar as amostras de forma genérica e os parâmetros químicos de forma independente. A hierarquização no dendograma utilizou os parâmetros para as amostras de solo COrg, MO, CTC, Ca, Ca trocável, Mg trocável, Na trocável, K trocável, acidez potencial, Al, Al disponível, pH, P disponível, Zn, Zn disponível, Mn, Mn disponível, Cu, Cu disponível, Pb, Pb disponível, Be, Ti, V, Fe, Si, Co, Ni, Cr, Ba, Y e Sr. Para as amostras de água foram utilizados os resultados de oxigênio consumido, condutividade, SDT, Ca, HCO_3^- , Mg, Pb, Cu, Fe, Zn, turbidez, Al, Cl^- , coliformes totais, nitrogênio amoniacal, SO_4^{2-} , K, Ba, P, Na, coliformes termotolerantes, pH e nitrogênio de nitratos.

O teste não paramétrico de *Kolmogorov-Smirnov* foi utilizado para verificar a aderência à normalidade de cada parâmetro pertencente aos grupos obtidos após a classificação hierárquica. Se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* é estatisticamente significativo, rejeita-se a hipótese nula, na qual se estipula que os dados seguem a distribuição testada (Ferreira, 2000).

Os métodos estatísticos de estimação por triangulação foram utilizados para a elaboração das figuras de dispersão dos analitos na área de estudo. Para tanto, foi utilizado o *software* SURFER 6.04 da *GOLDEN SOFTWARE INC*. A orientação espacial da área está baseada nas informações do Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 6.1 – Resultados das análises do solo, coletadas em malha regular 6x9 em junho de 2006, distribuídos no Grupo 1 (solo de cerrado), Grupo 2 (área de disposição do LETA), Grupo 3 (cascalheira isenta de LETA) e Grupo 4 (uso antrópico e áreas limítrofes). Foram adicionados os limites de detecção obtidos.

Parâmetros	Unidade	Grupo 1 (n=9)		Grupo 2 (n=9)		Grupo 3 (n=25)		Grupo 4 (n=11)		San Joaquin Soil	L. D.
		Desvio média	Desvio padrão	Desvio média	Desvio padrão	Desvio média	Desvio padrão	Desvio média	Desvio padrão		
C Orgânico	mg/kg de TFSE	20132	5813	26313	12421	2917	3121	12364	7161		0,06
Mat. Orgânica	g/kg de TFSE	34,7	10	45,4	21,4	5,03	5,38	21,3	12,3		0,1
CTC	cmolc/kg TFSA	6,37	1,50	6,86	2,90	2,52	0,67	4,91	1,85		0,02
Ca trocável	cmolc/kg TFSA	0,13	0,16	2,11	2,60	0,54	0,66	1,17	1,01		0,01
Mg trocável	cmolc/kg TFSA	0,51	0,23	0,49	0,23	0,56	0,26	0,53	0,19		0,01
Na trocável	cmolc/kg TFSA	0,0111	0,0065	0,0277	0,0290	0,0173	0,0082	0,0452	0,0692		0,0004
K trocável	cmolc/kg TFSA	0,0572	0,0371	0,0797	0,0584	0,0441	0,0187	0,1070	0,1225		0,0004
Acidez pot.	cmolc/kg TFSA	5,66	1,29	4,15	0,59	1,35	0,73	3,05	2,34		0
Al trocável	cmolc/kg TFSA	0,55	0,35	0,07	0,05	0,53	0,42	0,18	0,18		0,05
pH		5,19	0,27	5,24	0,53	5,51	0,48	5,72	0,45		0,1
P disponível	mg de P/kg	0,25	0,17	14,4	24,4	0,48	0,56	1,20	1,95		0,002
Zn disponível	mg de Zn/kg	0,64	0,25	4,08	2,19	1,50	0,92	2,99	3,08		0,43
Mn disponível	mg de Mn/kg	6,00	2,56	84,3	40,2	5,16	5,91	11,1	7,19		0,03
Cu disponível	mg de Cu/kg	0,37	0,17	0,57	0,27	0,60	0,37	0,78	0,49		0,097
Pb disponível	mg de Pb/kg	1,75	0,52	0,52	0,00	1,25	0,34	2,34	2,86		0,01
Be	mg de Be/kg	1,44	0,16	1,55	0,42	2,38	0,33	2,38	0,78	43,04	0,74
Al	mg de Al/kg	114203	8104	124574	18495	105940	14367	108984	17858	73000	0,028
Ca	mg de Ca/kg	267	362	1182	1265	576	698	1141	1455	18600	0,008
Ti	mg de Ti/kg	10103	1109	6414	1149	8906	1026	9228	2383	3280	0,0017
V	mg de V/kg	326	30,5	198	86,2	254	68,2	226	186	106,69	0,58
Mn	mg de Mn/kg	63,2	13,0	335	20,7	119	69,3	220	374	485,12	0,03
Fe	mg de Fe/kg	119277	31505	89378	26562	118249	44483	157600	50580	35200	0,0029
Si	mg de Si/kg	141578	14989	113733	11531	167429	24102	138178	24562	287900	0,0079
Co	mg de Co/kg	9,36	2,23	5,02	2,38	14,2	5,28	22,0	10,2	14,01	1,1
Ni	mg de Ni/kg	2,95	2,08	5,17	2,76	12,7	9,06	28,8	20,4	88,11	2,26
Cu	mg de Cu/kg	8,87	3,29	22,7	3,94	22,6	5,15	20,8	6,84	37,86	0,097
Zn	mg de Zn/kg	25,5	5,83	39,2	6,40	45,0	13,9	62,5	30,4	97,58	0,43
Cr	mg de Cr/kg	226	36,1	112	28,0	161	47,0	265	108	141	1,76
Ba	mg de Ba/kg	87,7	16,9	132	20,7	187	53,8	111	19,1	923,85	0,13
Pb	mg de Pb/kg	27,4	3,56	24,9	5,09	41,3	13,8	27,5	5,28	18,3	0,01
Y	mg de Y/kg	18,4	2,77	17,0	2,73	25,8	3,04	21,1	3,20	17	0,22
Sr	mg de Sr/kg	54,2	3,87	32,7	12,2	66,9	32,2	73,7	30,9	220	0,99
Mn disp./Mn	%	9,5	3,6	24,4	8,1	4,3	4,8	10,0	6,7		
Cu disp./Cu	%	4,2	1,2	2,5	1,1	2,6	1,4	4,1	2,6		
Pb disp./Pb	%	6,4	1,8	2,2	0,5	3,3	1,4	7,8	6,9		
Zn disp./Zn	%	2,6	1,0	10,4	5,4	3,4	2,1	6,1	7,0		
Quartzo		(m) ou (Tr)		(Tr) ou (Aus)		(Tr) ou (Aus)		(m) ou (Tr)			
Caolinita		(M)		(M)		(M)		(M)			
Gibbsita		(M)		(M) ou (m)		(m) ou (Aus)		(M)			
Goethita		(M) ou (m)		(Tr)		(m) ou (Tr)		(M) ou (m)			
Ilita		(Aus)		(m) ou (Aus)		(M) ou (m)		(M) ou (Aus)			
Variscita		(Tr) ou (Aus)		(Tr) ou (Aus)		(Aus)		(Aus)			
Rutilo		(Tr) ou (Aus)		(Aus)		(Tr) ou (Aus)		(Aus)			
Anatásio		(Tr) ou (Aus)		(Aus)		(Aus)		(Aus)			

Onde: TFSE significa terra fina seca em estufa; (M) constituinte maior, (m) constituinte menor; (Tr) traço; (Aus) ausente. Foram escolhidas aleatoriamente cinco amostras do Grupo 1, quatro do Grupo 2, dez do Grupo 3 e quatro do Grupo 4, para a avaliação da composição mineralógica.

As 54 amostras coletadas abrangeram uma área à montante da cascalheira, onde o solo foi preservado, e a cascalheira propriamente dita. Na cascalheira duas áreas merecem destaque, uma onde houve a disposição de LETA e outra onde não houve. Nas regiões limítrofes há ocupação por pequenas propriedades rurais, por lixões, além da estrada de acesso.

Os resultados das análises químicas e mineralógicas dos solos são apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2, enquanto as características das águas constam na tabela 6.3.

Pela classificação hierárquica, foram discriminados os grupos de 1 a 4, (Tabela 6.1, figuras 6.3 e 6.4), correspondentes, respectivamente aos solos do cerrado preservado (1), da cascalheira com deposição do LETA (2), da cascalheira sem deposição (3) e das áreas limítrofes de uso antrópico – estradas e proximidade das residências rurais (4). Na Figura 3, é evidente a maior afinidade das amostras das áreas de deposição do LETA com aquelas provenientes do cerrado, do que com as amostras da própria cascalheira sem o LETA.

Tabela 6.2 – Elementos químicos disponíveis no solo, lodo e coagulante.

Parâmetro	Un.	Solo (n=54)		LETA (n=2)		Al ₂ (SO ₄) ₃ (n=20)	
		média	Desvio padrão	média	Desvio padrão	média	Desvio padrão
Zn Disp.	mg/kg	2,10	2,10	1,54	0,09	8,63	1,94
Mn Disp.	mg/kg	19,70	33,60	80,76	1,33	89,17	18,56
Cu Disp.	mg/kg	0,60	0,40	0,13	0,01	ND	ND
Pb Disp.	mg/kg	1,40	1,40	0,31	0,00	2,71	0,67

A composição mineral dos solos da área mostrou uma variação do conteúdo de quartzo e illita correspondente ao próprio litotipo - o metarritmito argiloso (R4) – formado pela intercalação de níveis arenosos e pelíticos. As intensidades dos picos de illita tendem a ser maiores nas amostras referentes aos níveis pelíticos, nos quais o quartzo é constituinte traço ou não foi identificado. Por outro lado, este é o constituinte menor nos níveis arenosos. A goethita corresponde ao nível laterítico formado pelo enriquecimento supergênico em ferro e está presente em toda a área de estudo.

Estudos anteriores mostraram que a distribuição geoquímica dos elementos químicos em subsuperfície está fortemente associada à variação da composição mineral e granulometria nos perfis de solo da cascalheira (Moreira *et al*, 2007).

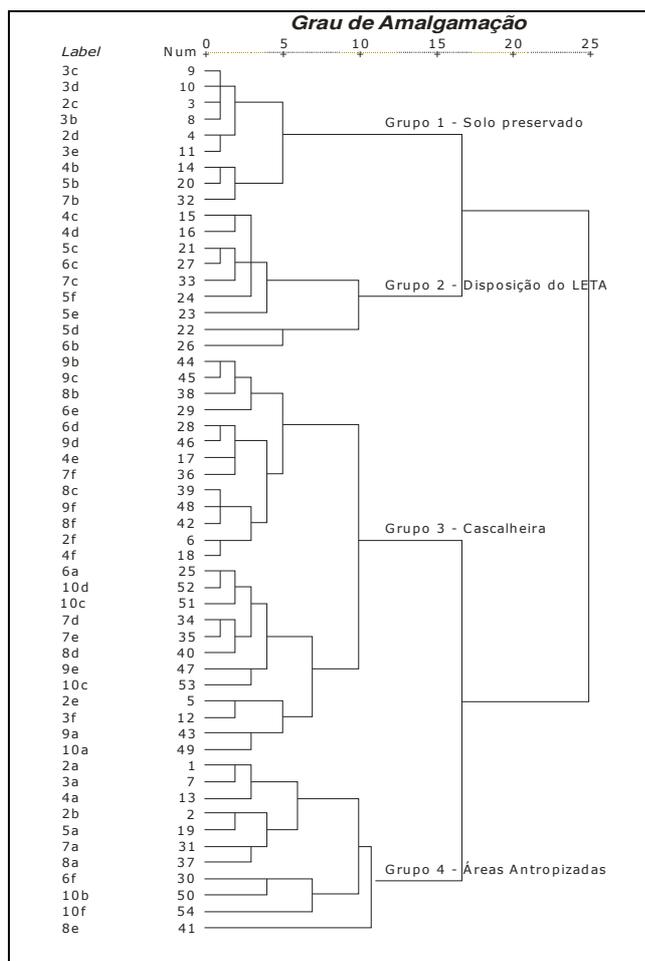


Figura 6.3 – Dendograma gerado a partir da classificação hierárquica dos pontos de coleta na área de estudo.

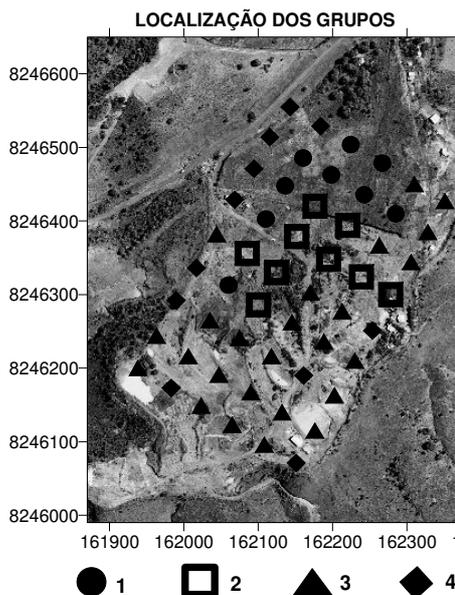


Figura 6.4 – Localização espacial dos grupos estabelecidos na Classificação Hierárquica.

No Grupo 1, que representa o solo original, predominam gibbsita, caolinita e goethita, enquanto o quartzo é constituinte menor ou traço. Tal composição explica as maiores concentrações de Si, Al e Fe neste grupo. Variscita, rutilo e anatásio, quando ocorrem, são constituintes traços e a concentração elevada de Ti é atribuída aos dois últimos.

O Grupo 2, associado à área de disposição do lodo, apresentou contribuição importante de gibbsita e caolinita. Ao contrário do Grupo 1, a goethita apresentou-se no Grupo 2 apenas em quantidades traço. O argilomineral illita foi considerado constituinte menor na metade das amostras, enquanto o quartzo e a variscita ocorrem ocasionalmente como traços.

Apesar da predominância da gibbsita e caolinita, dentre os grupos analisados, a concentração de Al trocável foi a mais baixa, da mesma forma que Pb. Resultado semelhante foi obtido pela aplicação do LETA na recuperação de área degradada por mineração de cassiterita, quando os autores atribuíram as baixas extrações de Pb ao aumento de pH (Teixeira *et al*, 2005). Entretanto, no presente estudo este não é o caso, já que o pH do substrato da área estudada é ligeiramente ácido (média de 5,24) e a acidez potencial (média 4,15) é considerada elevada em alguns pontos (Tabela 6.1), mas não é elevada a disponibilidade de Pb, tampouco de Al trocável na área de disposição do LETA (Fig. 6.5).

Foram observadas a elevação da CTC, maior disponibilidade da matéria orgânica e de alguns elementos químicos, tais como Ca, Cu, Al e Mn, bem como dos elementos disponíveis Ca, Zn, P e Mn. A elevação da CTC e as altas concentrações de matéria orgânica parecem ter sido determinantes para a imobilização do Al e do Pb, haja vista que o Al total apresenta concentrações médias mais elevadas nas áreas de disposição do lodo e as concentrações de Pb total são bem semelhantes às encontradas nos grupos 1 e 4 (Figura 6.5). A baixa mobilidade de metais catiônicos no solo pode ser atribuída a formação de complexos de esfera-interna (adsorção específica) com os minerais (Guilherme *et al*, 2005). Esse comportamento é bem conhecido no caso do Pb e essa interação tende a se tornar cada vez mais forte com o tempo, tornando a biodisponibilidade desse elemento cada vez menor. Mesmo sob baixo pH e acidez potencial elevada, os baixos teores de Al trocável podem estar ligados à interação físico-química do Al com a matéria orgânica e com os minerais do solo, que geram condições para a complexação do Al, deixando-o, inclusive, em uma forma menos tóxica para as plantas (Cambri, 2004). Estudos anteriores já haviam constatado que os teores de saturação por Al no LETA da ETA-RD eram, de fato, muito baixos (Moreira *et al*, 2003). O Mn disponível no



LETA indica a sua proveniência no coagulante sulfato de alumínio férrico (Tabela 6.2). A razão entre a concentração de Mn disponível e Mn total é a mais elevada entre os grupos e indica que o lodo apresentou percentuais elevados de Mn exatamente na forma mais facilmente assimilável pelas plantas (Tabela 6.1). Desta forma, a disposição do LETA na cascalheira contribuiu, de maneira significativa, não apenas com o aumento das concentrações de Mn das amostras de solo, mas com o aumento da mobilidade deste elemento. Di Bernardo *et al* (2002) realizaram ensaios de lixiviação e solubilização do lodo de duas estações de tratamento de água, uma que utilizava cloreto férrico e outra que utilizava sulfato de alumínio como coagulante, segundo a Norma NBR 10004. Nestes ensaios já chamava a atenção as concentrações elevadas de Mn obtidas nas duas ETAs nos dois ensaios e a baixa solubilização de Al na estação que utilizava sulfato de alumínio. O mesmo comportamento para Mn total e disponível foi obtido ao se aumentar o percentual de aplicação do LETA da ETA de Araraquara (SP) ao solo degradado por mineração de cassiterita (Teixeira *et al*, 2005). Os valores elevados de matéria orgânica neste grupo podem ser considerados positivos, já que propiciam a melhoria da estrutura do solo. Este é um fator preponderante para a recuperação de cascalheiras por meio de revegetação (Leite *et al*, 1992).

O Grupo 3 representa as áreas onde houve a exploração do cascalho. As amostras que representam esse grupo apresentaram constituição importante dos argilominerais caolinita e illita. A goethita apresentou-se como constituinte menor ou traço. Gibbsita, quartzo e rutilo, quando presentes apresentam-se em menores quantidades. Foram consideradas importantes as concentrações médias de Be, Si, Ba, Pb, Y e Mg trocável. Os resultados médios dos elementos químicos deste grupo foram utilizados para normalizar os resultados obtidos no Grupo 2 (Figura 6.6). Para tanto, foram calculadas as razões entre os valores das análises de solo dos elementos químicos dos pontos correspondentes ao Grupo 2 pelos valores médios das análises para o mesmo parâmetro do Grupo 3. Na Figura 6.6 pode-se ter uma idéia do grau de influência do LETA para a alteração da composição do substrato da cascalheira, sobretudo para a elevação dos teores de Mn e Ca.

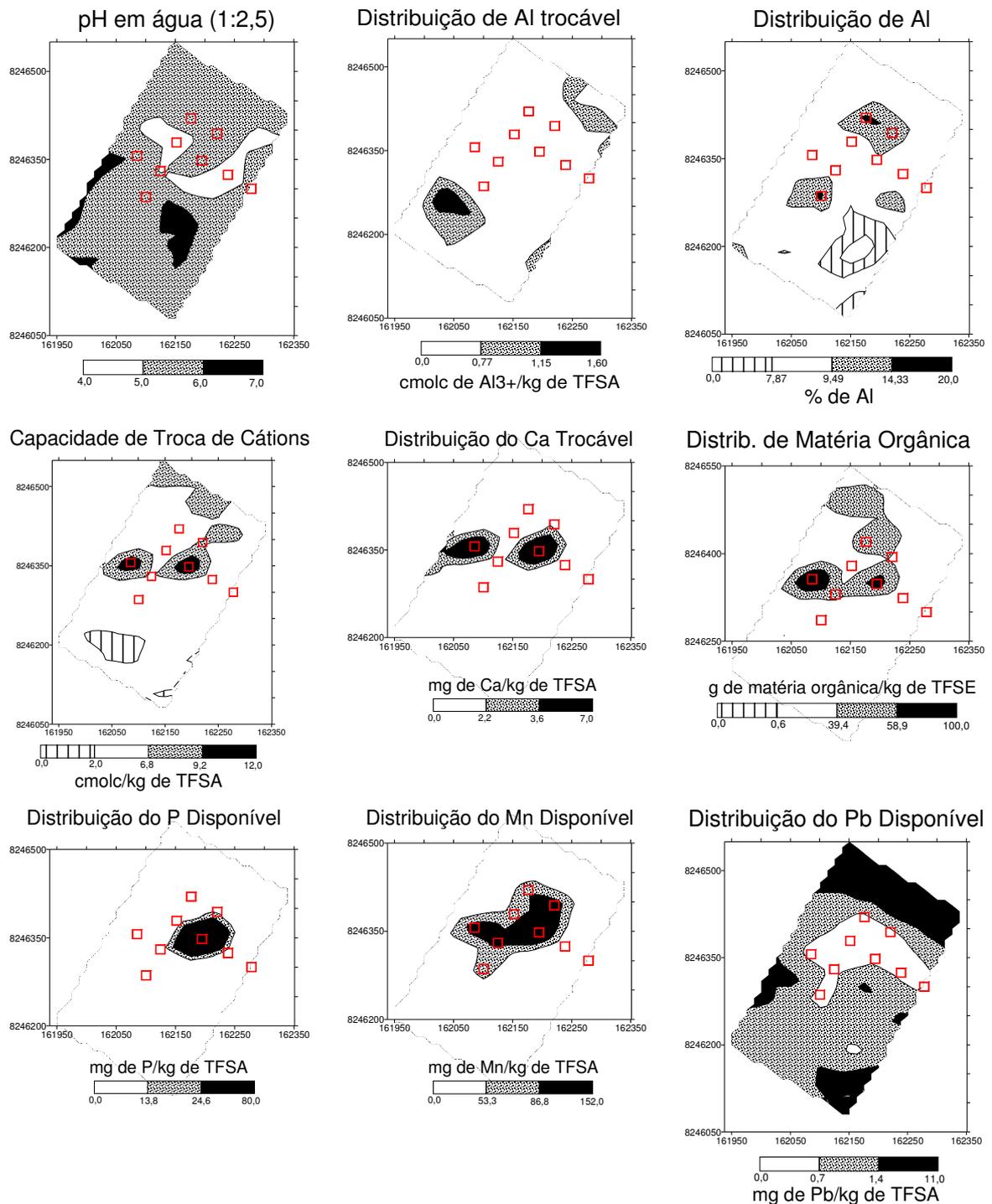


Figura 6.5 – Dispersão dos analitos na área de estudo. As anomalias são mostradas nas legendas com a cor sólida preta (anomalia positiva). Em vermelho a área de disposição do LETA. Nenhuma legenda foi atribuída aos valores situados no intervalo: média \pm 1 desvio-padrão. As partes brancas com bolas pretas para os valores obtidos para o intervalo em que a média era somada a 1 e 2 desvios e as linhas verticais pretas quando a média era subtraída de 1 a 2 vezes o desvio-padrão. As únicas figuras que não seguiram essa legenda foram as do pH e do Pb, onde se optou por uma outra escala, dada a sua criticidade à mobilização do Al e/ou toxicidade para as plantas.

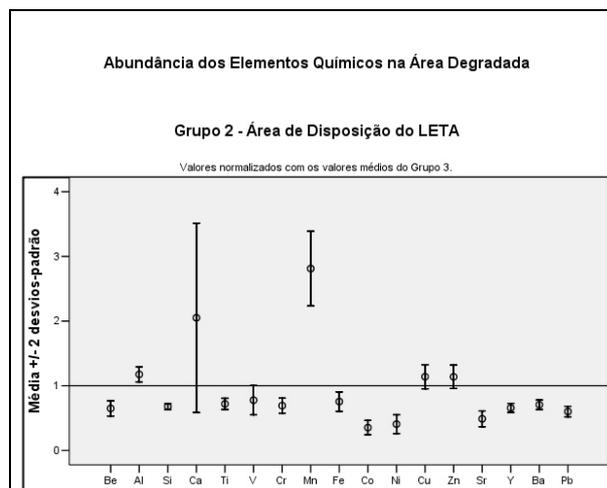


Figura 6.6 – Abundância dos elementos químicos na área de disposição do LETA.

As áreas próximas a residências, plantações, lixões e estradas foram reunidas no Grupo 4. A composição mineralógica ora se assemelha ao Grupo 1 ora ao Grupo 3. Apesar dos valores de pH terem sido os mais elevados dentre os grupos, as concentrações médias dos metais Fe, Co, Ni, Zn, Cr, Sr, Na e K trocáveis, além de Cu e Pb disponíveis são as mais altas. Essa aparente contradição pode ser atribuída às contribuições antrópicas associadas a esse grupo.

A gibbsita apresenta-se como constituinte maior nas amostras coletadas nas áreas de solo preservado (porção norte da área). No entanto, na cascalheira o seu predomínio se dá apenas nos locais de disposição do LETA, indicando que a origem desse mineral é o lodo da ETA-RD. Moreira *et al.* (2003) ao analisarem o LETA da ETA-RD, estimaram os percentuais de gibbsita entre 26,3 a 36% e os teores de caolinita entre 24,5 a 37,7%. Os autores atribuíram esses valores às áreas fonte, bastante intemperizadas e de baixa fertilidade, oriundas do Lago Descoberto-DF.

As análises de solo possibilitaram a elaboração de várias figuras de dispersão dos parâmetros investigados na área de estudo (Figura 6.5). Pela figura 6.5 é possível notar que os resultados das determinações de CTC, Ca trocável, MO, P e Mn disponível mostram-se fortemente relacionados à área de disposição do LETA, confirmando-se os resultados obtidos no dendograma.

Todas as amostras de água apresentaram fraca mineralização, com concentrações médias de SDT entre 21,5 e 58,2 mg/L. Os resultados das análises estão descritos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultados das análises de água.

Parâmetros	Unidade	P1 (n=12)		P2 (n=12)		P3 (n=12)		P4 (n=12)		P5 (n=12)		D1 (n=3)		D2 (n=3)		D3 (n=3)		L. D.
		desvio média padrão																
Profundidade	m	16,44	4,55	15,59	3,85	12,85	3,72	18,60	3,22	17,91	3,87							
pH		5,7	0,4	5,3	0,5	6,5	0,5	5,4	0,5	5,8	0,5	6,6	0,3	6,2	0,2	5,7	0,3	
Condutividade	µS/cm	34,8	57,6	31,7	24,2	85,6	39,5	33,0	18,3	54,0	29,2	12,8	3,7	26,9	7,1	29,3	40,4	
SDT	mg/L	23,7	39,2	21,5	16,4	58,2	26,9	22,4	12,5	36,7	19,9	8,7	2,5	18,3	4,8	20,0	27,5	
Dureza	mg CaCO ₃ /L	10,9	6,7	7,5	5,3	32,6	19,6	11,7	8,2	18,5	15,8	3,1	0,2	4,6	2,6	3,0	2,7	
Alcalinidade Total	mg CaCO ₃ /L	9,9	5,8	6,0	4,5	29,4	18,6	8,2	7,0	16,1	14,4	3,7	0,7	3,4	1,8	3,1	3,2	
Turbidez	NTU	23,2	54,5	52,0	91,2	359,3	1166,7	365,4	1105,8	10,1	11,2	6,5	1,1	48,8	61,9	17,7	2,0	0,1
Oxigênio Consumido	mg/L	2,9	1,3	2,4	1,1	2,5	0,9	3,4	1,9	2,9	1,3	3,8	.	3,1	2,3	1,7	0,4	
Na	mg/L	0,4	0,4	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,5	0,4	0,4	2,5	1,9	1,2	1,1	0,2	0,0	0,01
K	mg/L	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,2	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	1,2	0,3	1,8	1,8	0,01
Mg	mg/L	0,8	0,5	0,7	0,5	1,2	0,6	0,9	0,4	1,0	0,5	0,3	0,4	0,8	0,6	0,5	0,5	0,0
Ca	mg/L	3,1	2,3	1,8	1,8	11,0	7,6	3,2	3,1	5,8	5,7	0,5	0,3	0,5	0,2	0,4	0,2	0,02
Mn	mg/L	0,031	0,016	0,033	0,019	0,032	0,025	0,039	0,013	0,027	0,005	0,026	0,001	0,033	0,014	L 0,025	-	0,015
Fe	mg/L	0,161	0,135	0,268	0,236	4,209	15,126	1,371	3,946	0,185	0,103	0,590	0,198	0,923	1,383	0,370	0,000	0,010
Nitrogênio amoniacal	mg/L	0,028	0,017	0,029	0,021	0,032	0,027	0,039	0,050	0,034	0,038	0,040	0,014	0,060	0,046	0,110	0,028	0,020
Ba	mg/L	0,018	0,010	0,009	0,008	0,034	0,019	0,023	0,019	0,021	0,018	L 0,003	-	0,751	1,290	0,634	1,087	0,003
Zn	mg/L	0,029	0,011	0,041	0,026	0,927	0,952	0,029	0,010	0,036	0,017	L 0,012	-	0,018	0,007	0,017	0,009	0,012
Cu	mg/L	0,006	0,005	0,004	0,003	0,006	0,005	0,004	0,002	0,018	0,049	0,002	0,000	0,002	0,001	0,004	0,004	0,001
Cl	mg/L	0,7	0,4	0,7	0,4	0,8	0,5	0,7	0,2	0,8	0,5	1,1	0,4	1,2	0,9	1,4	1,2	0,1
SO ₄ ²⁻	mg/L	L 1,0	-	L 1,0	-	1,1	0,2	L 1,0	-	L 1,0	-	1,5	0,7	1,7	0,5	3,4	1,0	1,0
NO ₃ ⁻	mg/L	0,086	0,045	0,125	0,064	0,068	0,037	0,273	0,152	0,052	0,033	0,045	0,049	0,250	0,213	0,022	0,001	0,010
HCO ₃ ⁻	mg/L	12,05	6,78	7,27	5,55	35,91	22,72	10,83	8,40	19,68	17,52	4,50	0,85	4,17	2,22	3,80	3,91	
Al	mg/L	0,240	0,229	0,704	1,291	0,886	2,006	0,396	0,417	0,268	0,200	0,100	0,099	0,340	0,265	0,463	0,254	0,002
P	mg/L	0,035	0,036	0,032	0,018	0,047	0,039	0,083	0,067	0,051	0,037	0,084	0,042	0,024	0,029	0,017	0,002	0,002
CO ₂ livre	mg/L	50,24	27,65	46,75	26,12	17,00	9,88	63,60	67,06	36,22	18,36	2,85	2,29	4,76	3,25	12,89	10,07	
Pb	mg/L	0,156	0,084	0,194	0,136	0,286	0,348	0,170	0,115	0,297	0,169	0,052	0,010	0,019	0,027	0,039	0,018	0,004
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	Aus.	-	613,1	-	227,8	163,7	105,8	121,7									
Coliformes Totais	NMP/100mL	19,3	34,2	54,6	156,6	51,6	116,6	635,2	1059,6	275,8	690,5	G 2419,6	-	G 2419,6	-	G 2419,6	-	

Onde: Aus.: Ausência; L. D.: Limite de Detecção do Método; NMP: Número Mais Provável; L: Lower than; G: Greater than.

As águas dos poços de monitoramento têm fácies bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas (Figura 6.7a). Por sua vez, as drenagens apresentaram extensa variação na sua composição (Figura 6.7b).

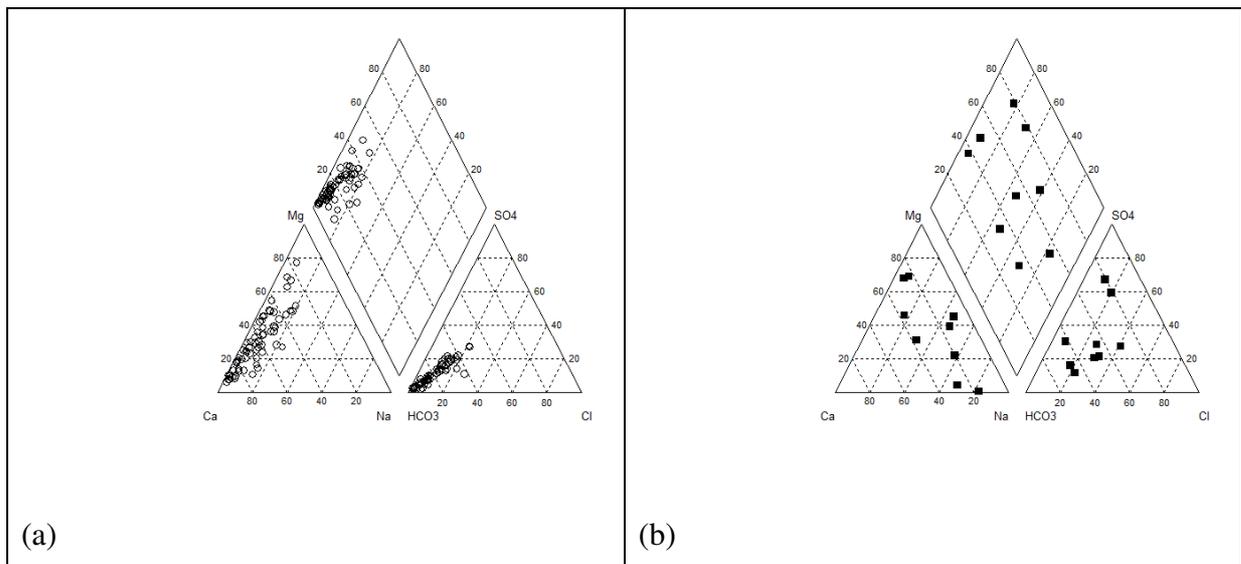


Figura 6.7 – Diagramas de Piper referentes aos poços de investigação (a) e drenagens na área de estudo (b).

As medições dos níveis da água dos poços de monitoramento, de dezembro de 2006 a fevereiro de 2008, mostraram que a superfície freática varia sazonalmente e que P1 e P2 se encontram em cotas superiores à do poço P5 (local de disposição do LETA), que por sua vez estava acima dos níveis da água na zona saturada em P3 e P4 (Figura 6.8). No mesmo período foram analisados os SDT nos poços de monitoramento e foi constatada também a variação sazonal das concentrações desses sólidos (Figura 6.9). A elevação da superfície freática favoreceu a lixiviação das substâncias químicas contidas nos metarritmitos, aumentando as concentrações de SDT nas amostras.

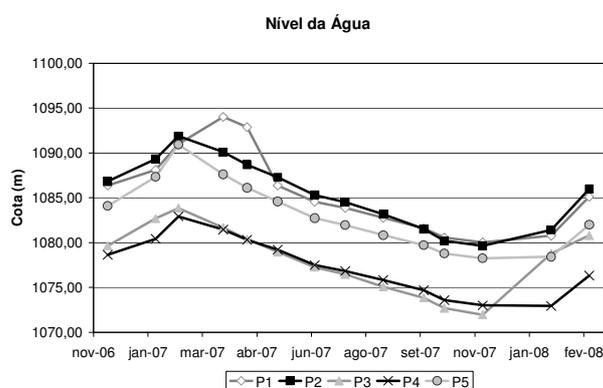


Figura 6.8 – Variação dos níveis da água medidos nos poços de monitoramento.

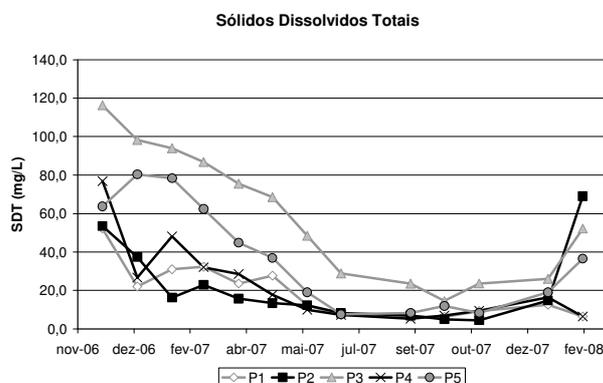


Figura 6.9 – Variação mensal das concentrações de SDT dos poços de monitoramento.

Pela classificação hierárquica dos pontos de coleta foi notada a separação em dois grupos (Figura 6.10). No primeiro grupo estão as amostras provenientes dos poços de monitoramento e no segundo as amostras colhidas nas drenagens.

No primeiro grupo há grande similaridade entre as amostras P1 e P2, que são as amostras situadas à montante do local de disposição do LETA. Estas amostras são então agrupadas à P5 e em seguida à P4. O ponto P3 mostrou pouca semelhança com os demais poços de monitoramento. Em P3 está ocorrendo um intenso processo de erosão interna

(*piping*), que provoca o carreamento de partículas do interior do solo pelo fluxo da água subsuperficial e gera “tubos” vazios que colapsam, formando voçorocas. Sendo assim, os resultados obtidos em P4 são mais adequados para a avaliação da água subterrânea à jusante da área de disposição do LETA que os de P3.

No segundo grupo há certa similaridade entre D2 e D3, que são drenagens à jusante da cascalheira. Essas amostras mostraram pouca semelhança com D1, que está situada à montante da área de disposição do LETA.

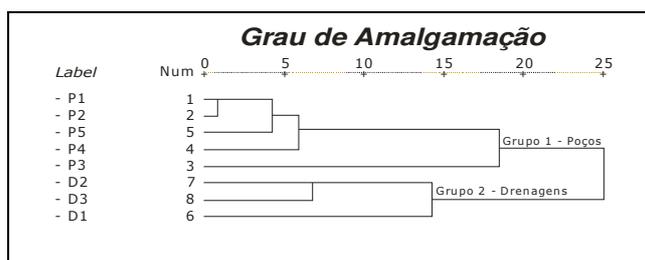


Figura 6.10 – Classificação hierárquica dos pontos de coleta de água.

A classificação hierárquica obtida com os resultados analíticos também apresentou dois grupos (Figura 6.11). O primeiro está relacionado às características geoquímicas dos corpos d'água, enquanto o segundo grupo está associado aos parâmetros relacionados às contribuições antrópicas.

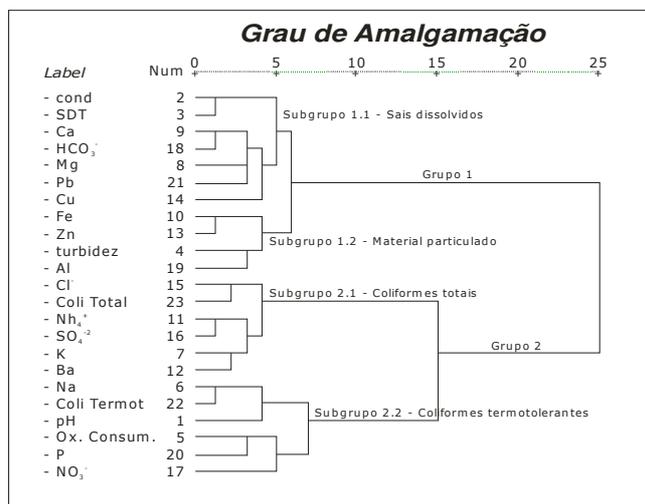


Figura 6.11 – Classificação hierárquica dos resultados das análises de água.

O primeiro grupo pode ser dividido em dois subgrupos. No primeiro subgrupo os elementos químicos Ca, Mg, Pb e Cu foram agrupados ao oxianion bicarbonato e aos SDT. A fase dissolvida das amostras pode estar sendo controlada pelo sistema ácido carbônico/bicarbonatos/carbonatos e, principalmente, pelo contato da água com a ocorrência



mineral (Boaventura & Freitas, 2006). No entanto, como P5 apresentou as concentrações médias mais elevadas dessas variáveis que P1, P2 e P4, a contribuição do LETA não pode ser descartada. O segundo subgrupo relacionou Fe, Zn e Al à fase particulada das amostras (turbidez). O material particulado pode estar associado aos minerais da região, que estão em processo de alteração, e como tal, servir para o transporte de outros compostos químicos nos sistemas aquáticos, conforme a capacidade de sorção desses minerais.

Parece contraditório que o LETA tenha imobilizado o Pb no solo e P5 ter sido o poço de monitoramento com a maior concentração desse metal dentre os corpos d'água investigados. Vale lembrar que as concentrações médias de Pb são elevadas em todos os poços de monitoramento, ou seja, mesmo nos poços à montante da área de disposição do LETA. Neste caso os teores elevados de Pb podem estar dissociados da atividade humana. Sabe-se que em certas condições a solubilidade do Pb pode ser aumentada. Entre o pH 6 e 8 a solubilidade do Pb é uma complexa função do pH e CO₂ livre (CANADÁ, 1993). Sob baixa alcalinidade e com pH abaixo de 6,5 a água pode apresentar um aumento significativo na solubilidade do Pb, chegando a valores tão altos como centenas de µg/L (Pitt *et al*, 1994). Portanto, como os poços apresentaram essas condições, a explicação para os altos teores de Pb pode ser atribuída muito mais as características naturais da água subterrânea do que a disposição do LETA propriamente dita. No entanto, o aumento dos SDT pode estar associado à atividade humana, já que o LETA é fonte de bicarbonatos e Ca.

O segundo grupo é o mais importante para a avaliação de contaminação ambiental e também pode ser dividido em dois subgrupos. Esses dois subgrupos são encabeçados por bactérias do grupo coliforme e, por isso, a eles são atribuídas características antrópicas. O primeiro subgrupo é o subgrupo dos coliformes totais e está associado ao nitrogênio amoniacal, aos cátions K e Ba e aos ânions Cl⁻ e SO₄²⁻. O nitrogênio amoniacal, SO₄²⁻ e Cl⁻, podem ter como fonte o lançamento de esgotos (BRASIL, 2003). Os compostos nitrogenados podem ainda ser utilizados como indicadores da “idade” da carga poluidora (esgotos) e que os ânions nitrato e cloreto são bons indicativos de poluição e contaminação de origem antrópica (lixões, aterros sanitários, esgotos, fossas sépticas, dejetos animais, etc) (BRASIL, 2003). As mais altas concentrações de nitrogênio amoniacal, Cl⁻ e SO₄²⁻ e as mais elevadas densidades de coliformes totais foram encontradas nas drenagens D1, D2 e D3. Neste contexto, as concentrações de nitrogênio amoniacal nestes pontos podem indicar a ocorrência de contaminação recente. Já os cátions K e Ba, que podem ter sua fonte antrópica tanto em lixões



como em insumos agrícolas, apresentaram as mais elevadas concentrações nas drenagens D2 e D3. Com relação aos poços de monitoramento, foi observado um gradiente nas densidades de coliformes totais no sentido do fluxo das águas subterrâneas. No entanto, a presença de coliformes totais não é conclusiva para a avaliação da contaminação, uma vez que essas bactérias podem estar presentes, naturalmente em solos, material particulado, restos de folhas, etc.

O subgrupo dos coliformes termotolerantes está associado aos parâmetros Na, pH, oxigênio consumido (matéria orgânica), além dos nutrientes P e NO_3^- . Os coliformes termotolerantes são utilizados como indicadores de contaminação microbiológica da água e foram encontrados nas drenagens D1, D2 e D3. Esses indivíduos não foram detectados nos poços de monitoramento. A presença dessas bactérias nas drenagens indica contaminação de origem fecal nessas águas, provavelmente pelo lançamento de esgotos domésticos da vizinhança. Já os parâmetros oxigênio consumido (P4, D1 e D2), pH (P3, D1 e D2), P (P4 e D1) e NO_3^- (P4 e D2) apresentaram os valores mais elevados tanto nos poços quanto nas drenagens indicadas. O cátion Na é um bom indicador de contaminação por lixões e esteve presente em concentrações mais elevadas nas drenagens D1 e D2.

A contaminação das águas das drenagens por esgotos domésticos e lixões inviabilizou os estudos da mobilidade dos elementos contidos no LETA nas águas superficiais.

CONCLUSÕES

A distribuição de gibbsita na área onde houve exploração de laterita (cascalho laterítico) indica a sua proveniência do próprio lodo disposto na cascalheira.

A área utilizada para a disposição do LETA apresentou maior similaridade com as áreas de cerrado preservado do que com a cascalheira propriamente dita. A distribuição horizontal de matéria orgânica, Ca trocável, Mn e P disponíveis, nos locais de disposição do LETA, são evidências do caráter não-inerte do lodo. A remobilização desses elementos e compostos pode ter estimulado o aparecimento de vegetação sobre os substratos de cascalheiras.

As altas concentrações de Mn obtidas no LETA e que estão sendo transferidas para o regolito na área degradada, são provenientes do coagulante químico utilizado no processo de tratamento da água.



Outro aspecto positivo evidenciado na área de estudo foi a imobilização de Al trocável e Pb disponível nas áreas de disposição do LETA.

As águas superficiais foram consideradas inadequadas para a avaliação ambiental, devido a contaminação bacteriológica pelo lançamento dos esgotos domésticos e disposição de resíduos sólidos pela comunidade local.

Apesar das águas subterrâneas investigadas serem consideradas fracamente mineralizadas, a lixiviação do LETA contribuiu com o aumento da concentração de sólidos dissolvidos para o lençol freático. No entanto, após dez anos de disposição de LETA na cascalheira, o impacto ambiental nas águas subterrâneas pode ser considerado pequeno, pois não houve sequer alteração da fácies da água subterrânea.

Sendo assim, o LETA pode ser considerado um resíduo não-inerte e compatível com o uso em recuperação de áreas degradadas situadas em regiões com características geológicas e hidroquímicas semelhantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da Água & Terra Consultoria e Planejamento Ambiental Ltda, em especial ao Geólogo Alexandre Matos Seidel, ao Professor Patrick Seyler pelo apoio e ao CNPq e CAESB pelo financiamento.



CAPÍTULO 7

Levantamento geofísico e mobilização de elementos e compostos químicos em área degradada utilizada para a disposição de lodo de estação de tratamento de água.

Moreira, R.C.A.^{1,2}, Boaventura, G.R.³, Nascimento, C.T.C.³, Pinheiro, L. A.¹, Lira, C. P.¹

¹Cia de Saneamento Ambiental do DF – CAESB, SAIN s/n ETA R1 laboratório B, CEP 72620-000, Brasília-DF, ricardomoreira@caesb.df.gov.br

²Curso de Pós-Graduação em Proc. de Dados em Geologia e Análise Ambiental, IG/UnB (doutorado)

³Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, CEP 70910900,

INTRODUÇÃO

As modificações ambientais em escala global decorrentes do processo antrópico de ocupação dos espaços e da urbanização impõem taxas incompatíveis com a capacidade suporte dos ecossistemas naturais. Nesse contexto, os mananciais superficiais têm sido cada vez mais castigados com lançamentos de despejos diversos, decorrentes do crescimento populacional e da ocupação desordenada das áreas de proteção.

Assim a qualidade da água piora, e para torná-la potável exige-se que maiores quantidades de produtos químicos sejam aplicadas para o seu tratamento. Como consequência, observa-se o acréscimo na geração de rejeitos nas estações de tratamento da água, ETAs, tais como lodos gerados em decantadores e água de lavagem dos filtros.

No Brasil existem cerca de 7500 ETAs, chamadas convencionais ou tradicionais, que empregam a coagulação / floculação / sedimentação e filtração. Esses sistemas geram rejeitos nos decantadores e nos filtros que, na grande maioria dos casos, são lançados diretamente nos rios, lagos e reservatórios, agravando a questão ambiental (Bidone *et al.*, 1997; Di Bernardo *et al.*, 1999; Parsekian, 1998).

O lodo químico produzido pelas Estações de Tratamento de Água, LETA, é um material extremamente gelatinoso, composto por hidróxidos de alumínio, partículas inorgânicas como argila e silte, colóides de cor e microrganismos, incluindo plâncton, além de outros materiais orgânicos e inorgânicos, que são removidos da água tratada, ou ainda

provenientes dos produtos químicos adicionados ao processo (Andreoli, 2001; Moreira *et al*, 2007). Seu pH varia de 5 a 7, sendo insolúvel na faixa natural de pH da água.

Estima-se que no Brasil sejam despejadas 2.000 toneladas/dia de LETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento (Cordeiro *in* Reali, 1999). Essa prática contribui para a contaminação orgânica gerada pelo lodo, que pode consumir o oxigênio dissolvido no curso d'água, levando a condições anaeróbias, com produção de odores, crescimento excessivo de algas e mortandade de peixes (Machado *et al*, 2005). Alguns estudos mostraram a toxicidade crônica desse material para os organismos aquáticos, assim como a degradação da qualidade da água e dos sedimentos (Barbosa *et al*, 2000; Sotero-Santos *et al*, 2005; George *et al*, 1995).

Várias alternativas têm sido apresentadas para o aproveitamento desse resíduo, minimizando o impacto ambiental.

Segundo Richter (2001 *apud* Machado *et al*. 2005), 25% dos resíduos gerados pelas ETAs nos EUA são aplicados em solos agrícolas. As principais vantagens são: a melhoria da estrutura do solo, o ajuste do pH, o aumento do número de poros e conseqüentemente da capacidade de retenção de água e a aeração do solo. As desvantagens são a possibilidade do aumento da concentração de metais pesados no solo e na água subterrânea e a adsorção do fósforo do solo pelos hidróxidos de alumínio e ferro, que afeta o crescimento de plantas e microrganismos, e provoca o decréscimo na produtividade do solo. Machado *et al*. (2005) realizaram estudos que atestam o uso dos resíduos de uma ETA em atividades agrícolas, por conterem macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento de plantas e vegetais em quantidades superiores aos encontrados em solos da região, não sendo verificadas concentrações de metais que possam ocasionar problemas de contaminação. Hyde & Morris (2000) utilizaram o lodo de ETA rico em Al na proporção de 100g/kg em solo contendo P disponível acima das concentrações consideradas ótimas e conseguiram reduzir de 30 a 60% esses teores, sem afetar o bom crescimento das plantas, nem tampouco provocar efeitos deletérios ao solo como alterações inaceitáveis do pH, salinidade, Al disponível e metais pesados. O benefício em se reduzir os níveis de P disponível nos solos está relacionado ao carreamento deste elemento químico pela chuva aos rios e lagos causando eutrofização.

Devido às características do lodo químico, a utilização em áreas degradadas ou em parques florestais pode trazer benefícios para o solo (Machado *et al.*, 2005). Moreira *et al*. (2007) estudaram a influência da disposição do LETA em uma cascalheira. Para tanto,



analisaram os minerais e a composição das amostras colhidas em sondagens, além de terem empregado técnicas de prospecção geofísica na área. Os resultados mostraram que a distribuição dos elementos em subsuperfície estava fortemente associada a composição mineral e a granulometria nos perfis de solo. Os nutrientes estavam sendo transferidos para os horizontes mais profundos do solo e permitiram a fixação de vegetação no local. Estes fatos foram considerados positivos para o uso desse material na recuperação daquela área degradada. Lenzi *et al.* (2005) também identificaram aplicações do lodo na recuperação do solo, desde que sejam tomados os mesmos cuidados que os admitidos para os lodos das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Moreira *et al.* (2003) caracterizaram o lodo da Estação de Tratamento da Água Rio Descoberto e encontraram valores elevados dos micronutrientes Zn, Fe, Mn e Cu, além de matéria orgânica. A acidez potencial foi considerada elevada, propiciando ao LETA maiores condições para a retenção dos ânions. No entanto, a baixa CTC efetiva indicou que o material pode liberar cátions para a coluna d'água. Estes resultados, aliados à deficiência em Ca^{2+} , K^+ e P, inviabilizam o uso do LETA como aditivo agrícola, mas o torna propício à recuperação de áreas degradadas.

A produção de ácidos voláteis pode ser acentuada pelo excesso de água do lodo químico (Bidone *et al. in* Andreoli, 2001). A acidogênese abaixa o pH do meio para faixas de 5 a 5,5 e pode permitir a dissolução de Al e outros metais (Di Bernardo *et al.*, 2002). No entanto, Guerra & Angelis (2005) estudaram a co-disposição do lodo com o solo utilizado na cobertura das células do aterro sanitário de Rio Claro-SP e concluíram que essa prática não influenciou de forma negativa o processo de biodegradação da matéria orgânica presente, possibilitando a atenuação de metais e componentes tóxicos ou perigosos.

Na Estação de Tratamento da Água Rio Descoberto o lodo proveniente da lavagem dos filtros é centrifugado e encaminhado, desde março de 1997, para a cascalheira desativada, com o objetivo de ser utilizado na recuperação daquela área degradada (Barbosa, 1997). A ETA-RD tem capacidade nominal para 6.000 L/s, utiliza o coagulante sulfato de alumínio férrico no tratamento da água do Lago Descoberto e trabalha com um alto índice de automatização dos seus processos. A produção anual de LETA desta estação ultrapassa 2.000 toneladas.

No Distrito Federal, onde está situada a capital do Brasil, as atividades para extração de areia, cascalho, argila e saibro são responsáveis pela quase totalidade das áreas degradadas (SEBRAE, 2004). Esse tipo de mineração caracteriza-se pelo baixo investimento, pela



ausência de aporte de tecnologia nas fases de produção, controle ambiental e recuperação das áreas mineradas. O uso de cascalheiras para a disposição final do lodo é uma prática adotada no Distrito Federal, mas ainda são poucos os estudos que atestem sobre os riscos que os componentes desse material possam trazer a essas áreas mineradas. Isto porque o potencial tóxico dos resíduos de ETAs depende principalmente das concentrações de metais presentes, além das características físico-químicas e das condições em que esses resíduos são dispostos.

Barroso & Cordeiro (2001) alertam para as ações tóxicas dos metais e do Al presente no lodo de ETA, com efeitos positivos ou negativos para os processos de tratamento, disposição final e reuso dos resíduos. A mobilidade de Al no solo ou na água tratada pode ser danosa, sobretudo porque esse elemento é considerado não essencial para plantas e animais, não sendo conhecida nenhuma função bioquímica nos organismos que seja dependente desse metal (Pereira & Reis, 2002). O Al é particionado na biota por diferenças nas afinidades ácido-básicas, por sua cinética, por forma temporal e, espacialmente, pelas membranas e compartimentos. Um dos aspectos da toxicidade desse metal, embora não seja o único, é a combinação química entre metais e ligantes no organismo (Merian & Clarkson, 1991).

Echart & Cavalli-Molina (2001) estudaram a fitotoxicidade do Al e constataram que esse metal é um dos principais responsáveis pelo baixo desenvolvimento de plantas economicamente importantes em solos ácidos. Isso porque em solos tropicais e subtropicais úmidos, com altas precipitações pluviométricas, os nutrientes solúveis como Ca, Mg, K e outros elementos básicos são lixiviados resultando, assim como a mineralização da matéria orgânica por microrganismos do solo, na diminuição do pH. Em baixo pH, o H^+ atua sobre os minerais liberando íons Al, que ficam predominantemente retidos pelas cargas negativas das partículas de argila do solo, em equilíbrio com o Al^{3+} em solução. Portanto, a quantidade de Al^{3+} em solução aumenta com a acidez do solo (Bohnen, 1995 *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001). A toxicidade do Al em plantas se dá pela inibição do crescimento da raiz que resulta em danos do sistema radicular, que pode conduzir à deficiência mineral e estresse hídrico (Degenhardt *et al*, 1998 *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001). Isso porque o Al tem preferência por doadores de oxigênio e alta afinidade por grupos carboxila e fosfato, ligando-se principalmente aos componentes da parede celular. Devido ao antagonismo entre Al e o Ca, e o potencial do Al^{3+} em interagir com qualquer sistema que usa Mg^{2+} ou qualquer forma de fosfato, o Al pode inibir um grande leque de processos metabólicos essenciais regulados por Ca, proteínas regulatórias ligadas a GRP e hexoquinases e a divisão celular pode ser



posteriormente afetada por tais alterações metabólicas (Martin, 1988; Rengel, 1992, *apud* Echart & Cavalli-Molina, 2001).

Neste trabalho procurou-se estabelecer os efeitos da disposição do LETA em uma área degradada pela extração da cobertura laterítica (cascalheira) e suas conseqüências no solo e na água subterrânea. Para tanto, pretendeu-se determinar a existência, a concentração e a mobilidade dos elementos e compostos químicos de origem antrópica, por meio de estudos geofísicos e geoquímicos pela comparação do local de disposição do LETA com outras áreas adjacentes, ainda pouco alteradas (*baseline*).

PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudo

O clima do Distrito Federal caracteriza-se por dois períodos distintos. O período seco, que se estende de maio a setembro e caracteriza-se por baixas precipitações, alta taxa de evaporação e baixos valores de umidade relativa do ar, algumas vezes inferiores a 15%, e o período chuvoso, de outubro a abril, que teve o índice pluviométrico de 1450 mm (out/07 a abr/08, Estação ETE Melchior. Fonte: PHIHM/CAESB). As temperaturas médias variam de um mínimo de 19°C nos meses de junho e julho até ápices de 22°C nos meses de março e setembro (Barbosa *et al*, 2003).

No DF, ocorrem rochas metassedimentares pertencentes aos Grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, distintos principalmente pelas correlações regionais com outras áreas da Faixa Brasília, pela intensidade de deformação e metamorfismo destas unidades e pela natureza dos litotipos.

O Grupo Paranoá corresponde a uma unidade psamo-pelito-carbonatada de idade mesoproterozóica interpretada como uma seqüência de deposição plataformar com variações na lâmina d'água no decorrer do tempo (Campos & Freitas-Silva *in* Fonseca, 2001). Freitas-Silva & Campos (1995) descrevem as coberturas terciário-quaternárias como provenientes de processos de intemperismo predominantemente químico, sob condicionantes geológicos, climáticos, topográficos, morfológicos, dentre outros, durante o Cenozóico. Estes processos proporcionaram o desenvolvimento de um extenso manto de intemperismo que alcança espessuras maiores que 50 metros.

A área de estudo, que corresponde a uma cascalheira desativada, está localizada nas proximidades da cidade de Ceilândia-DF (Figura 6.1). Nesta área, o resíduo do tratamento da



água do Lago Descoberto está sendo disposto diretamente sobre o regolito exposto após a extração da crosta laterítica. Constituem as chamadas “cascalheiras”, couraças lateríticas ferruginosas, que ocorrem nas bordas das chapadas (altitude 1050-1150m). A cascalheira utilizada, de acordo com o Mapa Geológico do DF, está posicionada sobre a Unidade R4 do Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozóica (Campos & Freitas-Silva, 1998).

A composição mineral dos solos da área apresenta uma variação do conteúdo de quartzo e de illita correspondente ao próprio litotipo - o metarritmito argiloso (R4) – formado pela intercalação de níveis arenosos e pelíticos. As intensidades dos picos de illita tendem a ser maiores nas amostras referentes aos níveis pelíticos, nos quais o quartzo é constituinte traço ou não foi identificado. Por outro lado, este é o constituinte menor nos níveis arenosos. A goethita corresponde ao nível laterítico formado pelo enriquecimento supergênico em ferro e está presente em toda a área de estudo (Moreira *et al.*, 2007b).

O perfil do solo original na cascalheira já não existe mais, devido à retirada da cobertura laterítica. O lodo é disposto diretamente sobre o regolito, definido como aquele material decomposto que repousa sobre a rocha-matriz, sem ter sofrido transporte.

A área de disposição do LETA corresponde a um platô com cerca de 75.000 m², com declividade média de 3,5% em sua maior extensão (NE-SW). As linhas de drenagem têm preferencialmente o sentido sudeste, desembocando a cerca de 500 metros no Córrego do Meio, ou Matadouro.

Apesar de modificada em seu aspecto original, pode-se ainda identificar, feições de vegetação do tipo campo sujo e campo limpo, em áreas preservadas.

A profundidade da superfície freática é superior a 10 m em toda a área de estudo. Foram encontrados dois poços na região, sendo um poço profundo à jusante da área e um poço raso à montante (cisterna). Embora ambos estejam desativados, a cisterna está sendo utilizada como fossa séptica.

O local de disposição do LETA é circundado por estradas de acesso e pequenas propriedades rurais, ocorrendo áreas degradadas com baixo índice de revegetação. É hábito da comunidade local, a utilização de voçorocas e ravinas como lixões, o que facilita o transporte de contaminantes do lixo para o lençol freático e drenagens.



Coleta de amostras

As amostras de solo provenientes da perfuração dos poços de monitoramento para a instalação de três poços de monitoramento foram coletadas entre setembro e outubro de 2006 (Figuras 4.3 e 4.4). A cada 3 metros de perfuração foi retirada uma amostra representativa desse intervalo.

Após as coletas, as amostras foram ensacadas, etiquetadas e transportadas para o laboratório central da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB. A etapa seguinte foi destorroá-las manualmente e submetê-las à secagem ao ar em local ventilado. Após a secagem, as amostras foram quarteadas, sendo retiradas alíquotas para as diversas análises e contraprovas. Posteriormente, a fração de interesse referente à granulometria menor ou igual a 2 mm foi separada, constituindo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Posteriormente, para a avaliação da qualidade da água na área impactada, foram obtidas amostras de água subterrânea por meio de poços de monitoramento. A localização dos poços está indicada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Poços de monitoramento localizados à montante (P Montante), à jusante (P Jusante) e na área de disposição do LETA (P LETA). Datum: Astro Chuá.

Poço de monitoramento	UTML	UTMN	ELEVAÇÃO (m)
P Montante	804752	8246764	1101
P Jusante	804903	8246729	1096
P LETA	804944	8246833	1101

As águas subterrâneas foram coletadas mensalmente, de dezembro de 2006 a novembro de 2007, com o auxílio de amostradores de polietileno para cada poço. O nível estático do poço foi medido antes da coleta das amostras de água. O branco de amostragem foi retirado para verificar se houveram contaminações do material de coleta.

Análise da Água

Os parâmetros pH, temperatura da água, condutividade e sólidos dissolvidos totais (SDT) foram medidos no campo. As amostras de águas subterrâneas foram acondicionadas sob refrigeração em frascos de polietileno (para análises físicas e químicas), de polietileno contendo 1,5mL de HNO₃/L (para análises de elementos traço) e em frascos esterilizados de vidro (para análise bacteriológica). O tempo entre a primeira coleta e o início das análises no



laboratório foi sempre inferior a 4 horas. No laboratório foram analisadas turbidez, Cl^- , K, Na, Al, Ca, nitrogênio de nitratos (NO_3^-), nitrogênio de nitritos (NO_2^-), nitrogênio amoniacal, CO_2 livre, SO_4^{2-} , Se, Hg, Sb, Pb, Ag, Mg, Fe, As, Ni, Cd, Cu, Cr, Mn, Ba, Co, Zn, Li, P, HCO_3^- , CO_3^{2-} , alcalinidade total, dureza total, oxigênio consumido, F^- , coliformes totais e coliformes termotolerantes das amostras (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

Métodos Geofísicos

Os desvios significativos do padrão normal das medidas geofísicas, que são as anomalias, podem do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em subsuperfície. Essa interpretação permite, inclusive, indicar a intensidade da contaminação presente, a fim de proporcionar importantes informações para as atividades de diagnóstico, monitoramento da propagação dos contaminantes e acompanhamento da recuperação de uma área degradada.

O método da eletrorresistividade é um dos mais utilizados em estudos ambientais e baseia-se na condução de corrente elétrica nos diversos materiais. Consiste na fixação de quatro eletrodos na superfície do terreno, sendo dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N). Através dos eletrodos A e B aplica-se uma corrente elétrica no subsolo e, através dos eletrodos M e N, mede-se a diferença de potencial associada à passagem dessa corrente. Conhecendo-se a corrente aplicada, a geometria da disposição dos eletrodos e o potencial medido, pode-se calcular o valor da resistividade elétrica aparente (Telford *et al.* 1985). A propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá pelo deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, quantidade de água e teor e natureza dos sais dissolvidos. Desses fatores, a salinidade, a conectividade dos poros, a temperatura e a quantidade de água são os mais importantes e permitem a imensa possibilidade de aplicações em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água na zona saturada e o aumento da concentração de contaminantes podem ser investigados.

Habitualmente, empregam-se estacas de metal como eletrodos. Existem diferentes maneiras de dispor os eletrodos uns em relação aos outros, bem como de transportá-los sobre o terreno a ser estudado. O arranjo de *Wenner* foi idealizado pelo norte-americano Frank Wenner em 1915 e é normalmente utilizado para perfilagem elétrica horizontal, que é caracterizada pela disposição equidistante dos eletrodos de potencial e de corrente, segundo

uma linha reta (Fetter, 1994; Koefoed, 1979; Van Nostrand e Cook, 1966).

O arranjo de *Schlumberger* é utilizado, preferencialmente, para sondagem elétrica vertical, que é a determinação da variação vertical da resistividade, sob um dado ponto do terreno. Esse arranjo foi criado pelo francês Conrad Schlumberger, e foi empregado inicialmente em 1912 (Koefoed, 1979; Van Nostrand e Cook, 1966). Nesse arranjo os eletrodos são distribuídos ao longo de uma linha reta, e a distância entre os eletrodos de corrente (AB) é maior ou igual a três vezes a distância entre os eletrodos de potencial (MN) (Koefoed, 1979).

Tanto os arranjos de Wenner como de Schlumberger podem ser usados para sondagens ou perfilagens.

Em maio de 2004 foram executadas cinco sondagens elétricas verticais na cascalheira. Como resultado, foi observado um alto contraste entre a resistividade do lodo químico e a laterita e o solo local, possibilitando a realização de novos levantamentos em detalhe e, posteriormente, a perfuração de poços de investigação.

Com o sucesso do experimento foram realizados mais dois levantamentos geofísicos na cascalheira para a investigação da área de influência do lodo químico. Para tanto, foram utilizados dois equipamentos: um resistivímetro modelo ER-300, fabricado pela PERGEO, que possibilita aplicar tensões de até 500 volts ao solo, que foi utilizado como fonte de corrente contínua, e um milivoltímetro fabricado pela TECTROL, que mede tensões entre 0 e 3000 mV, além de permitir a compensação do potencial natural do solo.

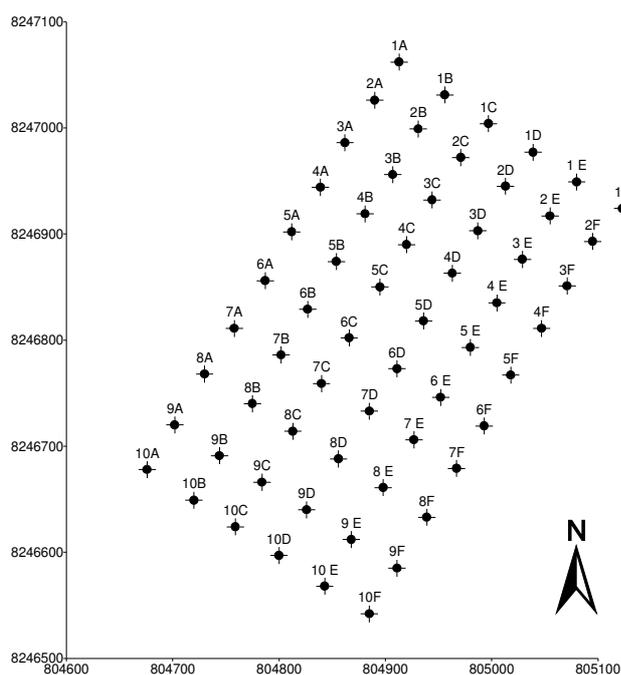




Figura 7.1 – Localização dos pontos de ensaios geofísicos na cascalheira. Datum: Astro Chuá.

No primeiro levantamento, realizado nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2005, foi estabelecida uma malha retangular com 6x10 pontos espaçados por 50 metros (Figura 7.1), onde foi empregado o método de resistividade elétrica, com arranjo de *Wenner* e espaçamento dos eletrodos de um metro.

No segundo levantamento, realizado em agosto de 2005, uma das linhas do estudo anterior foi escolhida e correspondia aos pontos 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D e 10D (Figura 7.1). Neste caso, foi empregado o método de eletrorresistividade com o arranjo de *Schlumberger* para execução das sondagens elétricas verticais.

Os dados foram tratados no Laboratório de Geofísica do Instituto de Geociências da UnB.

Métodos Geoquímicos

A característica geoquímica fundamental das emissões antrópicas contaminantes é justamente o desequilíbrio químico, com a conseqüente existência de elementos nas fases móveis.

Os procedimentos analíticos foram executados no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, bem como no Laboratório Central da Unidade de Monitoramento e Informações de Recursos Hídricos - PHI/CAESB. Para garantir a confiabilidade dos dados, amostras de referência geoquímicas foram analisadas nas mesmas baterias em que foram preparadas as amostras do estudo. Apenas os parâmetros com concentrações acima do limite de quantificação e com erro inferior a 10% relativo aos valores das amostras de referência estão sendo aceitas na avaliação.

As análises de pH (solo:água); carbono orgânico; matéria orgânica; capacidade de troca catiônica (CTC); Al^{3+} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis; P, Pb, Zn, Cu e Mn disponíveis; acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), foram realizadas segundo EMBRAPA (1997).

As determinações das concentrações de Si, Al, Fe, Ca, Ti, Sr, Cu, Zn, Y, Be, Ba, Co, Ni, Mn, Cr e V foram feitas utilizando-se espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) da marca *Spectroanalytical Instrumental GmbH*, modelo *Spectroflame FVM03*, equipado com monocromador com rede holográfica de 2400 estrias/mm e policromadores no vácuo e no ar. Para tanto, as amostras foram preparadas por decomposição ácida HF/HNO₃/HClO₄/HCl ou fusão alcalina, dependendo do analito

(Boaventura, 1991). As análises por espectrometria de absorção atômica com fonte eletrotérmica para o elemento Pb foram processadas com forno de grafite da marca GBC, modelo GF 3000, acoplado ao espectrofotômetro de absorção atômica da marca GBC, modelo 932 AA.

Todas as análises químicas foram realizadas com o uso de água de alta pureza (resistividade de 18,2 MΩcm) e reagentes de grau analítico. O ácido nítrico foi purificado pelo processo de sub-ebulição em destilador de quartzo MARCONI, modelo MA-075.

Análise dos resultados

A abundância normal de um elemento em um material, sem influência antrópica, é denominada “*background*”. E o *background* varia em função dos materiais, dos tipos de influências ambientais e de outras maneiras, correspondendo ao estado disperso de um elemento em um material amostrado, não atuando nenhum agente contaminante. No entanto, é sabidamente muito difícil, às vezes até mesmo impossível, obter materiais sem influência artificial, sem o contato antrópico ou antropogênico anterior. Sendo assim, recorre-se aos níveis de base, ou “*baseline*”, que nada mais são do que a concentração de um elemento ou substância em alguns pontos de amostragem no tempo e não correspondem necessariamente a um *background* verdadeiro, pois podem incluir a influência humana. Segundo Gough (1993 *apud* Rohde, 2004), nível de base é definido como o intervalo de dois desvios-padrão em relação à média, incluindo-se assim 95% do intervalo esperado para as concentrações.

Um elemento ou uma substância pode ser considerado contaminante ou anomalia, quando ocorre no ambiente em concentrações acima das consideradas como sendo os níveis de *background* ou *baseline*. Do ponto de vista ambiental, a anomalia significativa é aquela relacionada com a intervenção humana, quer seja direta ou indireta. As anomalias são consideradas não-significativas quando originadas por processos naturais, tais como mineralizações ou outras concentrações, desde que não apresentem conseqüências do ponto de vista ambiental. Halos de dispersão de um contaminante é a zona afetada pela sua ocorrência e mobilidade geoquímica.

Gonçalves *et al.* (1997) relata que as caracterizações químicas das amostras de lodo ensaiadas mostraram que a variação na qualidade da água bruta resultou em alterações significativas das propriedades químicas e físicas do lodo.

As análises de agrupamento consistem em estabelecer grupos naturais de objetos (formados a partir da distância ou similaridade entre eles) ou de descritores (estabelecidos pela dependência entre eles), de modo a reuni-los em um mesmo conjunto. Estes conjuntos mantêm uma relação hierárquica, combinando classes pequenas em classes cada vez maiores e menos homogêneas (Pielou, 1984 *apud* Farah, 2001). A classificação hierárquica foi então utilizada para agrupar os dados obtidos nas amostras de solo e de água, de acordo com o grau de “associação ou parentesco”. O método da Árvore Hierárquica, associado ao método de Ward, foi empregado adotando-se ainda a distância euclidiana e a normalização dos resultados por Z-Score. Esse método permitiu analisar as amostras de forma genérica, avaliando-se todos os parâmetros ao mesmo tempo. Os resultados foram representados graficamente na forma de dendogramas.

Estudos anteriores mostraram a dispersão de elementos químicos na cascalheira a partir da área de disposição do LETA (Moreira et al, 2007b). Paralelamente foi possível escolher locais propícios à instalação dos poços de monitoramento e estimar por interpolação as concentrações de vários analitos nas profundidades entre 10 e 20 cm da superfície. Esses resultados foram utilizados nos gráficos referentes aos perfis verticais.

Para a avaliação do grau de influência do LETA na área de disposição, o índice de geoacumulação, I_{geo} , proposto por Müller (1979; *apud* Förstner, 1989) foi modificado. O valor obtido permite classificar os níveis de enriquecimento dos metais em sete estratos, com intensidades progressivas de contaminação.

Este índice é calculado através da fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 (C_N / 1,5C_B)$$

Onde C_N = concentração do elemento n na amostra a ser classificada;

C_B = concentração média do elemento na área de controle (poço de monitoramento à montante);

1,5 = fator de correção para possíveis variações do *baseline* causado por diferenças litológicas.

Este índice consiste em sete classes distintas, que variam de 0 a 6 e estão relacionadas com o grau crescente de contaminação. O valor mais alto corresponde a um enriquecimento de aproximadamente 100 vezes em relação ao nível de referência.

A determinação das profundidades investigadas nos métodos geofísicos é obtida por meio da comparação dos dados de campo com modelos teóricos de estratificação da

subsuperfície. Os *softwares* SOUNDER (Gradient, 1991) e RES2DINV (Loke, 1997), possibilitam a interpretação semi-automática dos valores de resistividade elétrica e foram utilizados neste estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo primeiro levantamento geofísico obteve-se o mapeamento da pluma do lodo químico em subsuperfície, para uma profundidade teórica de 50 cm (Figura 7.2a).

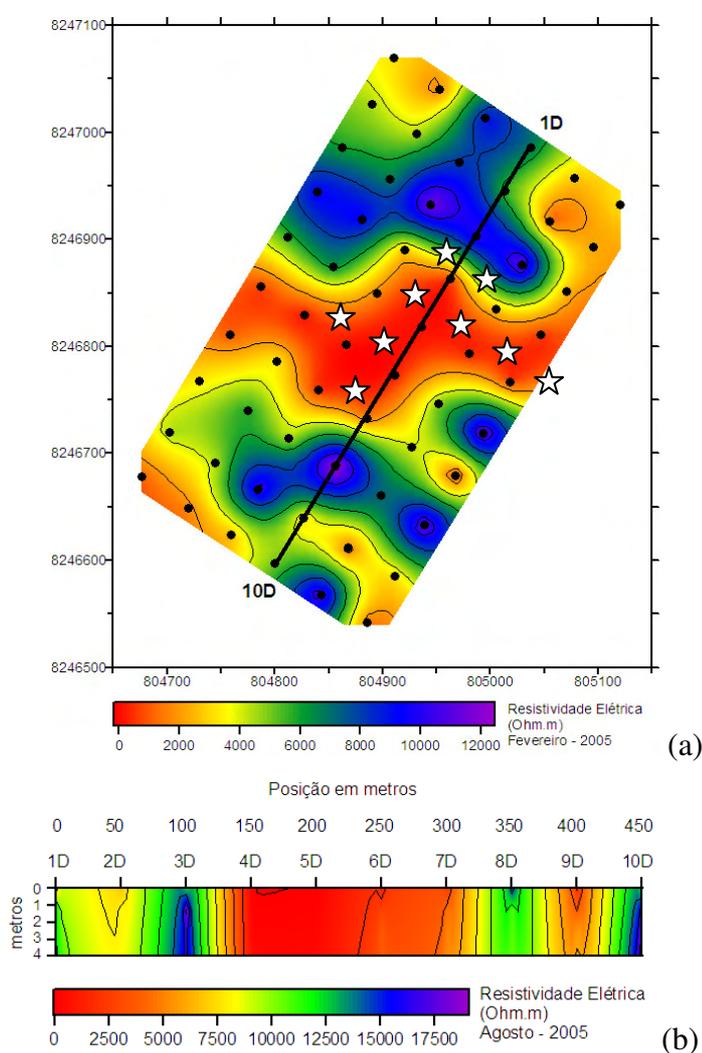


Figura 7.2. Levantamentos geofísicos na cascalheira. As manchas centrais correspondem à pluma advinda do lodo químico na área de estudo. (a) Mapeamento horizontal, os destaques em branco correspondem aos pontos de coleta localizados na área de disposição do LETA; (b) Sondagens elétricas verticais, destaque para a área entre 150 e 300 metros, onde há a disposição do lodo. As escalas gráficas são diferentes em virtude das diferentes épocas em que os dados foram obtidos.

O segundo levantamento possibilitou avaliar a extensão da pluma do LETA em subsuperfície ao medir a resistividade elétrica em vários níveis até atingir a profundidade teórica de 4 metros (Figura 7.2b).

Os levantamentos geofísicos permitiram mapear horizontal e verticalmente a área de influência do LETA na cascalheira. Os resultados obtidos permitem afirmar que o lodo é um resíduo não inerte e que o seu descarte requer certas precauções, conforme preconiza a Norma ABNT NBR 10.004 de 2004.

Os resultados médios e os desvios-padrão das análises químicas realizadas nas amostras de solo obtidas na perfuração dos poços de monitoramento estão listados na tabela 2. Os níveis de base foram determinados com base nos valores médios e desvios-padrão das amostras referentes ao poço à montante (tabela 7.2 e figura 7.3). Para possibilitar a comparação destes resultados com outros descritos na literatura, à tabela 7.2 foram acrescentados os valores de referência estabelecidos por Schellmann (1980) para argilitos e arenitos.

A classificação hierárquica foi calculada a partir dos resultados das análises dos elementos majoritários (Si, Al, Fe, Ti e K), menores (Ca e Mg) e traços (P, Be, Na, Mn, Co, Cu, Zn, Ba, Pb, Y e Sr), além das determinações de CTC, acidez livre e pH, das amostras de solo retiradas durante a perfuração dos poços de monitoramento. Pelo método da Árvore Hierárquica foi possível separar os horizontes de cada perfil laterítico (Figura 7.4). Costa (2007) estabeleceu padrões comportamentais dos teores de elementos e compostos químicos, quando observados da base para o topo em um perfil laterítico. Vários desses padrões foram identificados nas áreas de estudo. Dentre eles foram notadas a forte diminuição (lixiviação) dos teores de SiO_2 , o forte aumento nos teores de Fe na forma de oxi-hidróxidos, o grande aumento nos teores de Al, aumento gradual nas concentrações de Ti, forte aumento nos teores de P, Sr, Ba no topo do perfil, forte aumento apenas na base do perfil nos teores de Mn, este último mais evidente no poço de monitoramento à jusante. Esses padrões foram identificados nos três perfis, embora a amostra colhida na porção superior do poço LETA tenha apresentado características distintas se comparada aos demais horizontes, indicando que as alterações na composição são provenientes do lodo químico depositado na área. Os padrões estabelecidos por Costa (2007) corroboram os resultados obtidos pela classificação hierárquica, mostrando que esse método pode ser considerado adequado para a avaliação das amostras extraídas na cascalheira.

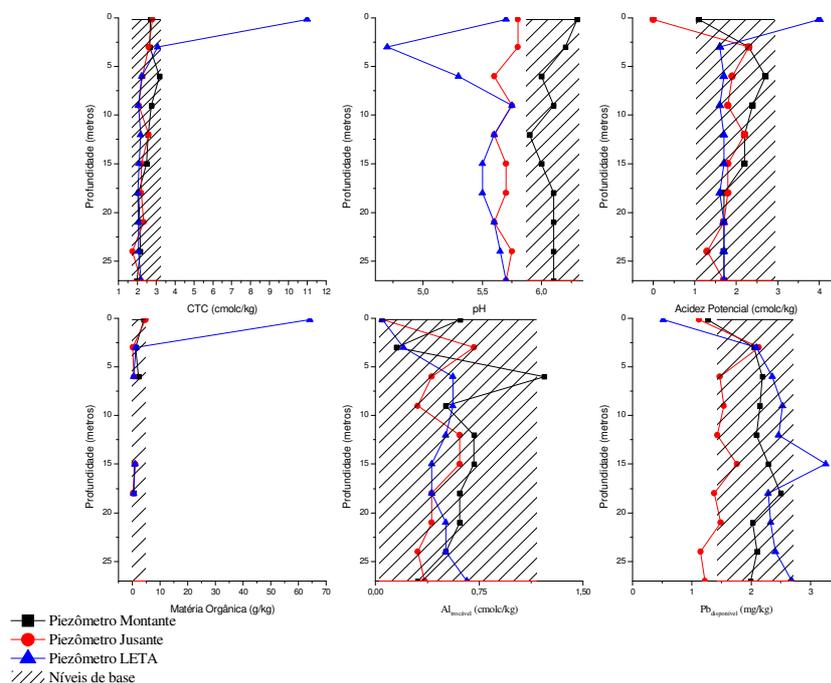


Tabela 7.2 – Resultados das análises químicas das amostras retiradas a cada três metros na perfuração dos poços.

Parâmetros	Unidade	Limite de Detecção	Poço à montante (n=10)		Poço à jusante (n=10)		Poço LETA (n=10)		Valores de Referência Schellmann (1980)	
			Desvio média	Desvio padrão	Desvio média	Desvio padrão	Desvio média	Desvio padrão	Argilito (n=74)	Arenito (n=23)
C Orgânico	mg/kg de TFSE	0,06	1030	900	800	1130	7830	16420		
Mat. Orgânica	g/kg de TFSE	0,1	1,76	1,51	1,38	1,94	13,51	28,34		
CTC	cmolc/kg TFSA	0,02	2,46	0,38	2,30	0,30	3,09	2,80		
Ca trocável	cmolc/kg TFSA	0,01	0,1311	0,2769	0,2551	0,6158	0,7648	1,8697		
Mg trocável	cmolc/kg TFSA	0,01	0,2692	0,1634	0,2976	0,1720	0,3288	0,1708		
Na trocável	cmolc/kg TFSA	0,0004	0,0019	0,0039	0,0027	0,0071	0,0080	0,0234		
K trocável	cmolc/kg TFSA	0,0004	0,0916	0,0334	0,0953	0,0319	0,0882	0,0222		
Acidez potencial	cmolc/kg TFSA	0,05	1,97	0,47	1,65	0,64	1,90	0,74		
Al trocável	cmolc/kg TFSA	0,05	0,5944	0,2814	0,4165	0,1899	0,4368	0,1829		
pH			6,09	0,11	5,70	0,08	5,50	0,31		
Al ₂ O ₃	mg de Al ₂ O ₃ /kg	529	191000	40300	166820	32964	174640	32075	269000	106000
CaO	mg de CaO/kg	112	2500	1100	2930	678	1560	795	1200	1100
TiO ₂	mg de TiO ₂ /kg	28	13000	3000	10780	2195	9490	1208	13600	8200
Na	mg de Na/kg	4	213	233	130	22	183	167	1400	3560
Mn	mg de Mn/kg	0,03	42,69	15,84	498,77	302,17	235,97	103,28	540	1630
Fe ₂ O ₃	mg de Fe ₂ O ₃ /kg	41	104500	72800	133530	50492	93910	19093	197000	163000
SiO ₂	mg de SiO ₂ /kg	169	579700	142900	580000	127387	584150	145370	392000	637000
MgO	mg de MgO/kg	166	4200	1900	8590	2818	2730	988	2500	2600
Co	mg de Co/kg	1,1	6,81	6,53	15,68	8,76	14,07	5,34	13	38
K	mg de K/kg	4	23215	19724	30853	22694	18497	12138	3490	4650
Cu	mg de Cu/kg	0,097	25,30	18,40	27,36	7,20	16,93	5,11	40	37
Zn	mg de Zn/kg	0,43	32,59	16,69	54,03	18,75	43,42	7,67	25	10
Ba	mg de Ba/kg	0,13	166,09	37,19	264,71	81,20	162,12	28,94	122	295
Pb	mg de Pb/kg	1	29,22	11,28	22,55	9,17	13,43	10,70	38	48
Y	mg de Y/kg	0,22	21,27	3,92	19,10	3,06	20,04	2,10	21	12
Sr	mg de Sr/kg	0,99	44,19	27,30	47,80	5,98	36,39	12,01	34	26
P disponível	mg de P/kg	0,002	0,52	0,34	1,54	0,94	7,42	20,41		
Zn disponível	mg de Zn/kg	0,43	0,33	0,55	0,31	0,32	0,59	1,05		
Mn disponível	mg de Mn/kg	0,03	1,17	1,44	1,97	2,08	15,94	44,80		
Cu disponível	mg de Cu/kg	0,097	0,49	0,42	0,50	0,16	0,40	0,09		
Pb disponível	mg de Pb/kg	0,01	2,07	0,32	1,47	0,30	2,29	0,70		
Be	mg de Be/kg	0,74	1,40	0,45	2,30	0,55	2,12	0,53		
Mn disp./Mn	%		2,44	1,72	0,99	2,24	3,66	8,69		
Cu disp./Cu	%		2,68	2,93	1,99	0,95	2,55	1,00		
Pb disp./Pb	%		8,24	3,73	7,69	3,48	29,84	19,70		
Zn disp./Zn	%		0,88	0,97	0,70	0,76	1,47	2,71		

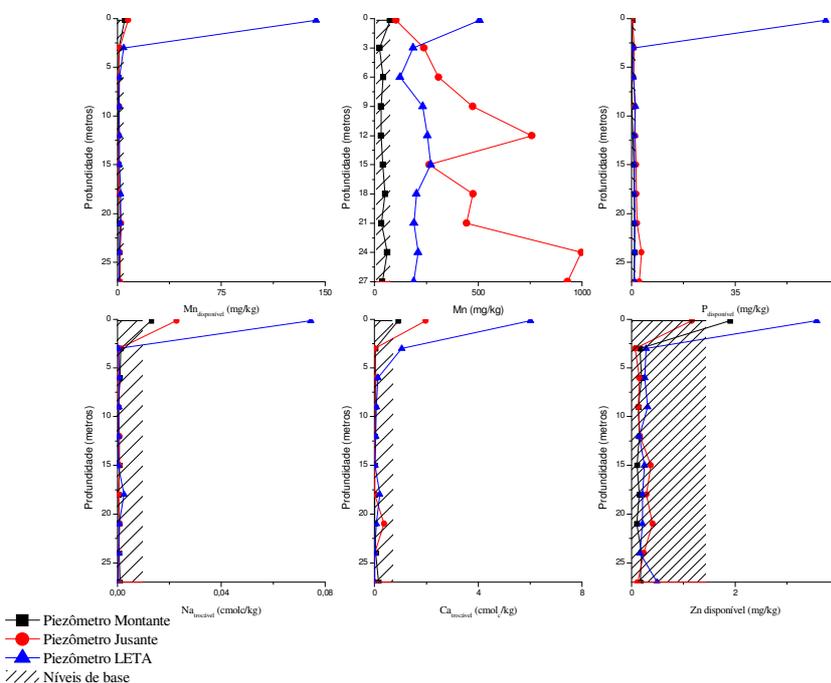
Onde: TFSE significa terra fina seca em estufa

Perfis Verticais



(a)

Perfis Verticais



(b)

Figura 7.3 – Perfis verticais de vários parâmetros analisados nas amostras obtidas na perfuração dos poços de monitoramento. As faixas que aparecem em destaque em cada um dos gráficos correspondem aos níveis de base (intervalo de dois desvios-padrão em relação ao valor médio das amostras da área de controle – Poço de monitoramento à montante). (a) Resultados de acidez potencial, CTC, pH, matéria orgânica, $Al_{trocável}$ e $Pb_{disponível}$; (b) Resultados de Mn, $Mn_{disponível}$, $Zn_{disponível}$, $P_{disponível}$, $Na_{trocável}$ e $Ca_{trocável}$.

De acordo com os valores obtidos para os Índices de Geoacumulação, os parâmetros são classificados em 7 classes relacionadas ao grau de poluição, conforme tabela 7.3. Os Índices de Geoacumulação mostraram que várias amostras do poço de monitoramento LETA apresentaram resultados que podem ser consideradas de moderadas a extremamente poluídas.

Os resultados médios e os desvios-padrão das análises químicas realizadas nas amostras de solo obtidas na perfuração dos poços de investigação estão listados na tabela 7.2. Os níveis de base foram determinados com base nos valores médios e desvios-padrão das amostras referentes ao poço de monitoramento à montante (tabela 7.2 e figura 7.3). Para possibilitar a comparação destes resultados com outros descritos na literatura, à tabela 7.2 foram acrescentados os valores de referência estabelecidos por Schellmann (1980) para argilitos e arenitos.

Pela figura 7.3 é possível notar a extensão dessas alterações ao longo dos perfis lateríticos, se compararmos os valores medidos com os obtidos na área de controle (Poço de monitoramento à montante). Na área de disposição do LETA, próximo à superfície do terreno, foram identificadas anomalias significativas positivas de Mn, Mn_{disponível}, CTC, acidez potencial, P_{disponível}, Zn_{disponível}, Ca_{trocável}, matéria orgânica e Na_{trocável}, além de pH mais baixo que o nível de base. O Pb_{disponível} foi considerado anômalo tanto em baixas concentrações (profundidade de 0,15m), quanto em altas concentrações (profundidade de 15m). No entanto, a influência do lodo é reduzida drasticamente à 3m e praticamente desaparece nas demais profundidades investigadas (figuras 7.3 e 7.4).

Moreira *et al* (2009) compararam a área de disposição do LETA com outras áreas da vizinhança e notaram a presença dos minerais gibbsita e caolinita. Apesar da predominância desses minerais, que possuem alumínio na sua composição, as concentrações de Al trocável foram consideradas baixas. Observaram também que a CTC era elevada se comparada às áreas adjacentes, havia menor disponibilidade de Pb e maior concentração de matéria orgânica e de alguns elementos químicos, tais como Ca, Cu, Al e Mn, bem como dos elementos disponíveis Ca, Zn, P e Mn. A baixa mobilidade de metais catiônicos no solo pode ser atribuída a formação de complexos de esfera-interna (adsorção específica) com os minerais (Guilherme *et al*, 2005). Esse comportamento é bem conhecido no caso do Pb e essa interação tende a se tornar cada vez mais forte com o tempo, tornando a biodisponibilidade desse elemento cada vez menor. Mesmo sob baixo pH e acidez potencial elevada, os baixos teores de Al trocável podem estar ligados à interação físico-química do Al com a matéria orgânica e

com os minerais do solo, que geram condições para a complexação do Al, deixando-o, inclusive, em uma forma menos tóxica para as plantas (Cambri, 2004). Estudos anteriores já haviam constatado que os teores de saturação por Al no LETA da ETA-RD eram, de fato, muito baixos (Moreira *et al.*, 2003). O Mn disponível no LETA tem a sua origem no coagulante sulfato de alumínio férrico (Moreira *et al.*, 2007b). A razão entre a concentração de Mn disponível e Mn total foi a mais elevada na área de disposição do LETA e indicou que o lodo apresentou percentuais elevados de Mn exatamente na forma mais facilmente assimilável pelas plantas. Desta forma, a disposição do LETA na cascalheira tem contribuído, de maneira significativa, não apenas com o aumento das concentrações de Mn no solo, mas com o aumento da mobilidade deste elemento. Da mesma forma, os valores elevados de matéria orgânica nesta área podem ser considerados positivos, já que propiciam a melhoria da estrutura do solo. Este é um fator preponderante para a recuperação de cascalheiras por meio de revegetação (Leite *et al.*, 1992).

Tabela 7.3 – Classificação dos parâmetros pelo índice de geoacumulação, conforme o grau de poluição.

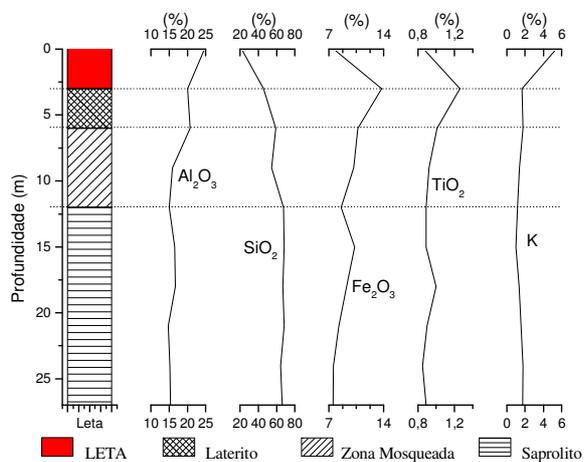
Classificação	Classe do I_{geo}	I_{geo}
Extremamente Poluído	6	>5
Fortemente à Extremamente Poluído	5	>4 a 5
Fortemente Poluído	4	>3 a 4
Moderadamente à Fortemente Poluído	3	>2 a 3
Moderadamente Poluído	2	>1 a 2
Não Poluído a Moderadamente Poluído	1	>0 a 1
Praticamente Não Poluído	0	<0

Tabela 7.4 – Índices de Geoacumulação obtidos nas amostras de solo do poço de monitoramento LETA.

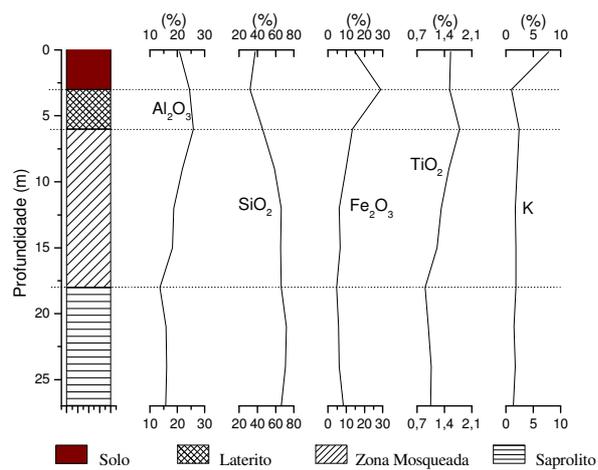
Prof. (m)	Classe I_{geo}						
	0	1	2	3	4	5	6
0,15	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,Zn,Be,Co	Mg _{tr} ,K _{tr} ,K,Na	CTC	Mn,Zn _{diss}		MO, Ca _{tr} ,Na _{tr}	Mn _{diss} , P _{diss}
3	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,MO,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Zn _{diss} ,P _{diss} ,Zn	Be,Co	Mn _{diss} ,Mn	Ca _{tr}			
6	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,MO,Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss} ,P _{diss} ,Zn,Be	Mn,Co					
9	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss}	P _{diss} ,Zn,Be,Co	Mn				
12	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss}	P _{diss} ,Zn,Be,Co	Mn				
15	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Cu _{diss} ,MO, Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss}	P _{diss} ,Pb _{diss} ,Zn, Be,Co		Mn			
18	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,MO,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss} ,Zn,Be	Ca _{tr} ,P _{diss} ,Co	Mn				
21	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss} ,Zn	P _{diss} ,Be,Co	Mn				
24	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss} ,Ca _{tr} ,Mg _{tr} ,Na _{tr} ,K _{tr} ,CTC,Na,K,Mn _{diss} ,Zn _{diss} ,Zn	P _{diss} ,Be,Co	Mn				
27	SiO ₂ ,Al _{tr} ,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,CaO,MgO,Fe ₂ O ₃ ,Sr,Cu,Y,Ba,Pb,Pb _{diss} ,Cu _{diss}	Zn _{diss} ,P _{diss}	Mn				



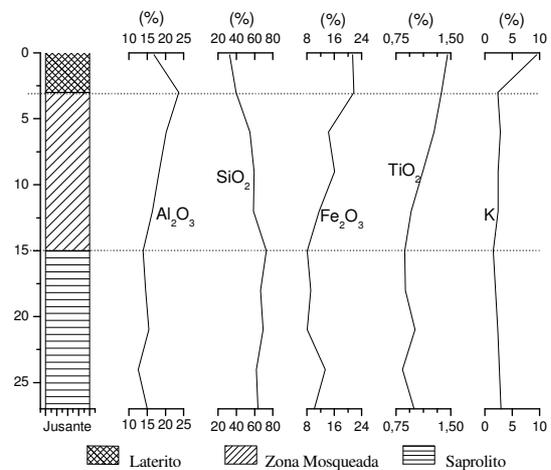
Ca_{tr}, Mg_{tr}, Na_{tr}, K_{tr}, CTC, Na, K, Mn_{diss}, Zn, Be, Co



(a)



(b)



(c)

Figura 7.4 – Classificação hierárquica das amostras extraídas na perfuração dos poços de investigação. As análises dos elementos majoritários, a maior parte na forma de óxidos, foram colocadas em paralelo para indicar os horizontes diagnósticos. (a) Poço LETA, (b) Poço à montante e (c) Poço à jusante.

As medições dos níveis da água dos poços de investigação, de dezembro de 2006 a fevereiro de 2008, mostraram que a superfície freática varia sazonalmente (figura 7.5). De dezembro de 2006 a novembro de 2007 foram analisados os SDT nos poços de monitoramento e foi constatada também a variação sazonal das concentrações desses sólidos (figura 7.6). A elevação da superfície freática favoreceu a lixiviação das substâncias químicas contidas nos metarritmitos, aumentando as concentrações de SDT nas amostras.

Santos *et al* (2007) classificaram os principais aquíferos explorados no Distrito Federal para o abastecimento público por meio de diagramas de íons de maior abundância e também por classificações hierárquicas. Os poços situados sobre o Subsistema R4 mostraram caráter bicarbonatado cálcico ou sódico, dependendo das variações das litologias que compõem esses aquíferos. O pH apresentou ampla variação (desde 5,5 até 7,5), assim como a condutividade elétrica (de 6 a 90 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e dureza da água (entre 20 e 40 mg de $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$).

Os poços de monitoramento da cascalheira apresentaram resultados semelhantes aos encontrados por Santos *et al.*, embora em algumas coletas, sobretudo na segunda metade de 2007, os resultados tenham sido mais baixos que os relatados, em todos os poços. De uma maneira geral, as amostras de água subterrânea apresentaram fraca mineralização, com concentrações médias de SDT variando entre 21,5 e 36,7 mg// (tabela 7.5). As águas dos poços de monitoramento têm fácies bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas (Figura 7.7).

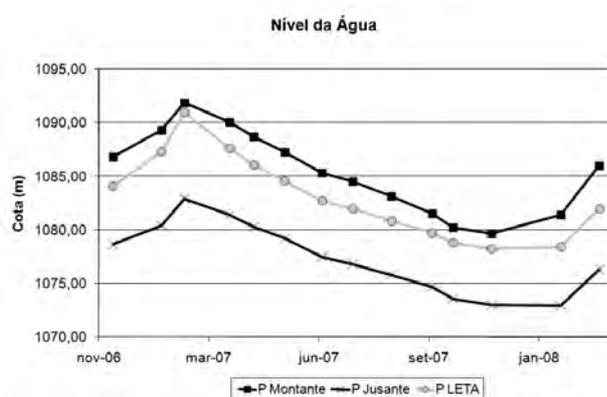


Figura 7.5 – Variação dos níveis da água medidos nos poços de monitoramento.

Boaventura & Freitas (2006) estabeleceram indicadores inorgânicos da qualidade da água subterrânea do Distrito Federal. Nos quarenta poços profundos investigados foram analisados os parâmetros pH, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Cu, Cd, Cr, Mn e Zn. Foram consideradas como características de amostras pouco perturbadas por atividades humanas, a baixa condutividade, o pH menor que 5 e as concentrações de Na, K e Ca abaixo de 0,45 mg/L. As concentrações de elementos-traço tendem a ser baixas e o aumento da condutividade pode ser entendido como o primeiro sinal de alteração da qualidade da água. Anomalias de Na, Cl^- e NO_3^- foram relacionadas à diluição de esgotos, assim como os altos valores de concentração de Al e Cu associados à alcalinidade e às águas com pH maior que 5.

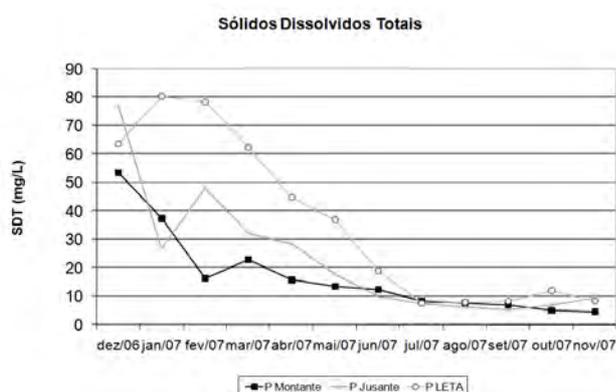


Figura 7.6 – Variação mensal das concentrações de SDT dos poços de monitoramento.

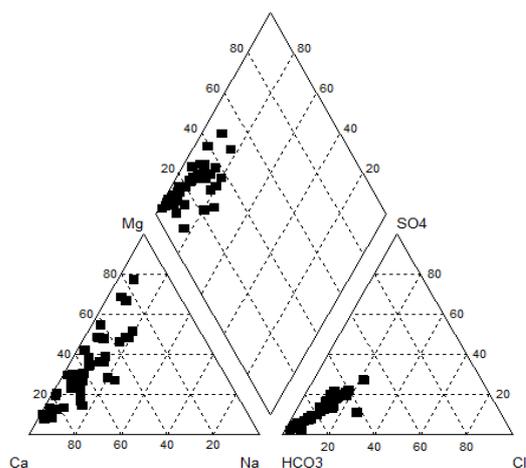


Figura 7.7 – Diagramas de Piper referentes às amostras de água dos poços de investigação.



Dessas características, não foram notadas alterações quanto às concentrações de Na, Cl⁻, NO₃⁻ e K. No entanto, a área de disposição do LETA apresentou pequena elevação de pH, motivada pelo aumento da concentração de Ca e da alcalinidade e, conseqüentemente, aumento da condutividade elétrica, dureza e SDT (tabela 7.5). Isto porque Ca é um elemento que pode apresentar mobilidade geoquímica pela lixiviação nos vários horizontes, durante o intemperismo laterítico (Anand & Paine, 2002).

Tabela 7.5 – Resultados das análises de água.

Parâmetros	Unidade	Poço Montante (n=12)		Poço Jusante (n=12)		Poço LETA (n=12)		L. D.
		média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão	
Profundidade	m	15,59	3,85	18,60	3,22	17,91	3,87	
pH		5,3	0,5	5,4	0,5	5,8	0,5	
Condutividade	µS/cm	31,7	24,2	33,0	18,3	54,0	29,2	
SDT	mg/L	21,5	16,4	22,4	12,5	36,7	19,9	
Dureza	mg CaCO ₃ /L	7,5	5,3	11,7	8,2	18,5	15,8	
Alcalinidade Total	mg CaCO ₃ /L	6,0	4,5	8,2	7,0	16,1	14,4	
Turbidez	NTU	52,0	91,2	365,4	1105,8	10,1	11,2	0,1
Oxigênio Consumido	mg/L	2,4	1,1	3,4	1,9	2,9	1,3	
Na	mg/L	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,01
K	mg/L	0,3	0,1	0,4	0,2	0,3	0,1	0,01
Mg	mg/L	0,7	0,5	0,9	0,4	1,0	0,5	0,0
Ca	mg/L	1,8	1,8	3,2	3,1	5,8	5,7	0,02
Mn	mg/L	0,033	0,019	0,039	0,013	0,027	0,005	0,015
Fe	mg/L	0,268	0,236	1,371	3,946	0,185	0,103	0,010
Nitrogênio amoniacal	mg/L	0,029	0,021	0,039	0,050	0,034	0,038	0,020
Ba	mg/L	0,009	0,008	0,023	0,019	0,021	0,018	0,003
Zn	mg/L	0,041	0,026	0,029	0,010	0,036	0,017	0,012
Cu	mg/L	0,004	0,003	0,004	0,002	0,018	0,049	0,001
Cl	mg/L	0,7	0,4	0,7	0,2	0,8	0,5	0,1
SO ₄ ²⁻	mg/L	L 1,0	-	L 1,0	-	L 1,0	-	1,0
NO ₃ ⁻	mg/L	0,125	0,064	0,273	0,152	0,052	0,033	0,010
HCO ₃ ⁻	mg/L	7,27	5,55	10,83	8,40	19,68	17,52	
Al	mg/L	0,704	1,291	0,396	0,417	0,268	0,200	0,002
P	mg/L	0,032	0,018	0,083	0,067	0,051	0,037	0,002
CO ₂ livre	mg/L	46,75	26,12	63,60	67,06	36,22	18,36	
Pb	mg/L	0,194	0,136	0,170	0,115	0,297	0,169	0,004
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	Aus.	-	Aus.	-	Aus.	-	
Coliformes Totais	NMP/100mL	54,6	156,6	635,2	1059,6	275,8	690,5	

Onde: Aus.: Ausência; L. D.: Limite de Detecção do Método; NMP: Número Mais Provável; L: Lower than; G: Greater than.

Embora os teores de Pb nas amostras extraídas na perfuração do poço de monitoramento LETA estejam abaixo dos valores de referência (tabela 7.2) e dos valores médios obtidos nas amostras dos demais poços, que é uma evidência de que o LETA não é fonte de Pb, a relação Pb_{disponível}/Pb nesse perfil laterítico mostra que a mobilidade desse elemento é maior na área de depósito do lodo. Parece contraditório que o LETA tenha imobilizado o Pb no solo e o poço LETA ter sido o poço de monitoramento com a maior concentração desse metal na água dentre os corpos d'água investigados. Vale lembrar que as



concentrações médias de Pb são elevadas em todos os poços de monitoramento, ou seja, mesmo nos poços à montante da área de disposição do LETA. Neste caso os teores naturais elevados de Pb podem estar dissociados da atividade humana. Sabe-se que em certas condições a solubilidade do Pb pode ser aumentada. Entre o pH 6 e 8 a solubilidade do Pb é uma complexa função do pH e CO₂ livre (CANADÁ, 1993). Sob baixa alcalinidade e com pH abaixo de 6,5 a água pode apresentar um aumento significativo na solubilidade do Pb, chegando a valores tão altos como centenas de µg/L (Pitt *et al*, 1994). Portanto, como os poços apresentaram essas condições, a explicação para os altos teores de Pb pode ser atribuída muito mais às características da água subterrânea do que à disposição do LETA propriamente dita. Ou seja, o LETA não é a fonte de Pb para a água subterrânea, mas indiretamente, as alterações na hidroquímica, como o aumento do pH e da alcalinidade, podem estar aumentando a atividade química e, com isso propiciando a mobilização de Pb, já que o LETA é fonte de bicarbonatos e Ca. É possível que a aplicação de algum composto para a correção do pH do solo, que não seja considerado poluente, produza efeito semelhante ao do LETA com relação a plumbossolvência.

CONCLUSÕES

Os levantamentos geofísicos permitiram mapear horizontal e verticalmente a área de influência do LETA na cascalheira. Este fato permite afirmar que o lodo é um resíduo não inerte e que o seu descarte requer certas precauções, conforme preconiza a Norma ABNT NBR 10.004 de 2004.

A influência da disposição do lodo químico rico em alumínio na área de empréstimo foi bem caracterizada pelo levantamento geofísico, utilizando-se o método da resistividade elétrica. Do ponto de vista nutricional, o uso do lodo para a recuperação de áreas degradadas torna-se promissor ao se avaliar os teores de P e de matéria orgânica. Para estes parâmetros, os altos valores encontrados no lodo químico são transferidos para os horizontes mais profundos do solo, possibilitando o desenvolvimento da vegetação no local. Outro aspecto positivo evidenciado na área de estudo foi a imobilização de Al trocável e Pb disponível nas áreas de disposição do LETA.

Os perfis lateríticos foram bem caracterizados devido à grande variação da composição química entre os horizontes.



A porção superior do perfil laterítico da área de depósito do lodo químico apresentou anomalias positivas de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, acidez potencial, $Ca_{\text{trocável}}$, $Na_{\text{trocável}}$, $Mn_{\text{disponível}}$, $Zn_{\text{disponível}}$, Mn e $P_{\text{disponível}}$, assim como valores anômalos negativos de pH e $Pb_{\text{disponível}}$, que são evidências do caráter não-inerte desse material. No entanto, a remobilização desses elementos e compostos pode ter estimulado o aparecimento de vegetação sobre os substratos de cascalheiras, já que estas áreas apresentam, normalmente, baixa fertilidade.

Apesar das águas subterrâneas investigadas serem consideradas fracamente mineralizadas, a infiltração e percolação das águas pluviais através do LETA tem provocado a migração de sólidos dissolvidos totais para o lençol freático, sobretudo nas formas de bicarbonatos e Ca. É possível que esse efeito tenha mobilizado o Pb e provocado o aumento das já elevadas concentrações desse elemento químico nas águas subterrâneas. No entanto, após dez anos de disposição de LETA na cascalheira, o impacto ambiental nas águas subterrâneas pode ser considerado pequeno, pois no diagrama de *Piper* não foi notada sequer a alteração da composição química dessas águas.

Sendo assim, o LETA pode ser considerado um resíduo não-inerte e compatível com o uso para a recuperação de áreas degradadas situadas em regiões com características geológicas e hidroquímicas semelhantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições dos Professores Milton Araújo da Costa Filho e Augusto Hosanna pela ajuda com as figuras, de Zoé Aparecida Fontes Pereira e de toda a equipe da PMA/CAESB pela viabilização, perfuração e construção dos poços de monitoramento e ao CNPq e CAESB pelo financiamento.



CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Existe um alto contraste entre os valores de resistividade elétrica medidos no LETA e nas áreas vizinhas (laterita e solo local), que permitiram estabelecer a extensão da área de influência da disposição do lodo químico rico em Al na área de empréstimo, tanto vertical quanto horizontalmente. Neste contexto, tanto o arranjo de *Wenner* quanto o arranjo de *Schlumberger* foram considerados adequados para a avaliação ambiental.

Os levantamentos geofísicos preliminares permitiram vislumbrar a possibilidade de perfuração de poços de investigação na cascalheira que, por sua vez, possibilitaram avaliar a existência ou não de contaminação das águas freáticas.

A caracterização preliminar do lodo disposto na cascalheira mostrou que, ao se desidratar o LETA, formam-se grânulos de difícil separação (granulometria de areia), com redução das concentrações dos elementos de maior mobilidade como Na, Li e Ni, e aumento dos teores de matéria orgânica e dos elementos P, Co, Mn e Fe. Esse fato pode ser considerado positivo, já que a manutenção desses nutrientes no solo pode ter estimulado o aparecimento de vegetação sobre os substratos de cascalheiras.

A distribuição geoquímica dos elementos em subsuperfície está fortemente associada à variação da composição mineral e granulometria nos perfis de solo. Essa variação da composição química entre os horizontes do solo possibilitou que os perfis lateríticos fossem bem caracterizados ao se utilizar análises de agrupamentos.

A dispersão geoquímica do lodo de estação de tratamento de água foi evidenciada nos primeiros metros da zona não saturada do perfil laterítico da área de empréstimo. Pela classificação hierárquica é possível notar que a área de disposição do LETA tem se tornado mais semelhante às áreas de cerrado preservado que à cascalheira propriamente dita. A comparação com as áreas de controle mostrou que existem diferenças significativas na



composição química e mineral das amostras coletadas nos primeiros metros dos perfis de solo. Essas diferenças foram notadas, principalmente, na porção superior do perfil laterítico da área de depósito do LETA e devem-se a presença de matéria orgânica sobre o regolito, ao aumento da capacidade de troca catiônica, à acidez potencial mais elevada e às concentrações mais elevadas de P disponível, P total, Ca trocável, Mn, Mn disponível, Na trocável e Zn disponível, além dos valores anômalos negativos de Al trocável, pH, Pb disponível e Si. Essas diferenças foram consideradas como evidências do caráter não-inerte desse material, sendo ainda constatadas nos índices de alteração química e no índice de geoacumulação que foi obtido para alguns parâmetros.

Do ponto de vista nutricional, o uso do lodo para a recuperação de áreas degradadas torna-se promissor ao se avaliar os teores dos micro e macronutrientes, cujos altos valores encontrados no lodo químico estão sendo transferidos para os horizontes mais profundos do solo, possibilitando o desenvolvimento da vegetação no local. Além disso, a matéria orgânica contribui para a imobilização do Al e Pb, reduzindo-se a toxicidade para as plantas.

Quanto à composição mineral, os solos da área apresentaram variação do conteúdo de quartzo e de illita correspondente ao próprio litotipo - o metarritmito argiloso (R4) – formado pela intercalação de níveis arenosos e pelíticos. As intensidades dos picos de illita tendem a ser maiores nas amostras referentes aos níveis pelíticos, nos quais o quartzo é constituinte traço ou não foi identificado. Por outro lado, este é o constituinte menor nos níveis arenosos. A goethita corresponde ao nível laterítico formado pelo enriquecimento supergênico em ferro e está presente em toda a área de estudo. A distribuição de gibbsita na área onde houve exploração de laterita (cascalho laterítico) indica a sua proveniência do próprio lodo disposto na cascalheira. Esse mineral pode ser utilizado para rastrear a área de dispersão do LETA.

As altas concentrações de Mn obtidas no LETA e que estão sendo transferidas para o regolito na área degradada, são provenientes do coagulante químico utilizado no processo de tratamento da água.

As águas superficiais foram consideradas inadequadas para a avaliação ambiental, devido a contaminação bacteriológica pelo lançamento dos esgotos domésticos e disposição inadequada de resíduos sólidos pela comunidade local.

Apesar das águas subterrâneas investigadas serem consideradas fracamente mineralizadas, a infiltração e percolação das águas pluviais através do LETA tem provocado a migração de sólidos dissolvidos totais para o lençol freático, sobretudo nas formas de



bicarbonatos e Ca. É possível que esse efeito tenha mobilizado o Pb e provocado o aumento das já elevadas concentrações desse elemento químico nas águas subterrâneas. No entanto, após dez anos de disposição do lodo químico rico em Al na cascalheira, o impacto ambiental nas águas subterrâneas pode ser considerado pequeno, pois no diagrama de *Piper* não foi notada sequer a alteração da classificação dessas águas, que é baseada na sua composição química.

Sendo assim, o LETA pode ser considerado um resíduo não-inerte e compatível com o uso em recuperação de áreas degradadas situadas em regiões com características geológicas e hidroquímicas semelhantes.



CAPÍTULO 9

BIBLIOGRAFIA

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (2000) *Alumínio e Saúde: Comissão de Segurança e Saúde*, 2ª. Edição, maio de 2000.
- ANAND, R. R. & PAINE, M. (2002) Regolith geology of Yilgarn Craton, western Australia: Implication for exploration. **Australian Journal of Earth Sciences**, 49: 3-162.
- ANDREOLI, C. V. (2001) *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Projeto PROSAB, RiMa, ABES, Rio de Janeiro, 282 p. ISBN: 85-86552-19-4.
- APHA-AWWA-WPCF. (1998) *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 20th ed., USA.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004. (2004) Resíduos Sólidos – Classificação. Brasil, v. 2, 71p.
- AWWA – American Water Works Association. (1995) *An Assessment of cropland application of water treatment residuals*. AWWARF, USA.
- BARBOSA, A. B. D. (1997) *A experiência da CAESB em recuperação de água de lavagem de filtros e desidratação de lodo de ETA*. Anais em Cd-Rom do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu.
- BARBOSA, A.B.D.; MORATO, M.A.; BORGES, M.N.; GARRIDO, M.A.; FERREIRA, M.F.; MOREIRA, R.C.A.; SANTOS, R. M. M. (2003) *Plano de Monitoramento da Estação de Tratamento Rio Descoberto*. Relatório Interno. CAESB, Brasília, 34p.
- BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. (2000) *A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água à Daphnia similis (CLADOCERA, CRUSTACEA)*. Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre.
- BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. (2001) *Metais e sólidos: Aspectos legais dos resíduos de estação de tratamento de água*. Anais do 21º Congresso Bras. de Engenharia Sanitária e Ambiental, CD-ROM, João Pessoa.
- BEREND, K.; VOET, G. V. D.; BOER, W. H. (2001) *Acute aluminum encephalopathy in a dialysis center caused by a cement mortar water distribution pipe*. **Kidney International**, v. 59 (2), 746 p.
- BÉRUBÉ, D. & BRÛLÉ, D. G. (1999) *A field aluminium speciation method to study the aluminium hazard in water*. **Fresenius J Anal Chem: Springer-Verlag**, nº 363, p. 566-570.
- BIDONE, F. R. A; de CASTRO, C. M. B. e ABOY, N. (1997) *Monitoramento de Parâmetros Físico/Químicos de Lodos de ETAS durante a sua Desidratação em Leitões de Secagem com Diferentes Espessuras de Leito Drenante*. Anais em Cd-Rom, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu.



- BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. (2001) Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários, Capítulo 9, pg. 215 a 244. In: ANDREOLI, C. V. (Coord). *Resíduos sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. RiMa, ABES, Rio de Janeiro, 282 p.:il. (Projeto PROSAB). ISBN: 85-86552-19-4.
- BOAVENTURA, G. R. (1991) *Performance do Espectrômetro de Emissão com Plasma (ICP), Spectroflame FVM03, para determinação de 20 elementos químicos nas amostras de referência geoquímica DNC-1, W-2, UNB-B1 e UNB-G2*. In: III Congresso Bras. Geoq., São Paulo, SBGq., Resumos, **2**: 423-426.
- BOAVENTURA, G. R. E FREITAS, A. L. S. (2006) Inorganic parameters as water quality indicators in acidic groundwater in a tropical region – Brasília DF (Brazil). **Water, Air, and Soil Pollution**, 171, 135.
- BRASIL; *Zoneamento Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno: Fase I*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, EMBRAPA, MI/SCO, Rio de Janeiro, 2003.
- CAESB – COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DF. (2004) *Sinopse do Sistema de Abastecimento de Água – DF*. Publicação disponível na internet, acessada em 5 de outubro de 2006 no site www.caesb.df.gov.br.
- CAMBRI, M. A. (2004) *Tese de Doutorado em Agronomia*, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil.
- CAMPOS, J. E. G. & FREITAS SILVA, F. H (1998) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do distrito Federal. Relatório Técnico Hidrogeologia do Distrito Federal*, 4 v., IEMA/UnB, Brasília, p. 1-84.
- CAMPOS, J. E. G. & FREITAS-SILVA, F. H. Geologia in Fonseca, F. O. (coord.) 2001. *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Brasília.
- CANADÁ (1993) *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*; FEDERAL PROVINCIAL ADVISORY COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AND OCCUPATIONAL HEALTH AND WELFARE, Canadá.
- CARMO, M. S.; BOAVENTURA, G. R.; ANGÉLICA, R. S. (2003) *Estudo geoquímico de sedimentos de corrente da bacia hidrográfica do Rio Descoberto (BHRD), Brasília/DF*. **Geochimica Brasiliensis**, 17(2) 106-120.
- CETESB (1988) *Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água*. 1ª edição; São Paulo.
- CETESB (2001) *Manual de gerenciamento de áreas contaminadas*. 2ª. edição. Projeto CETESB – GTZ, São Paulo, 389 p., il.
- CHOUDHURI, A. (1997) *Geoquímica para Graduação*. Editora da UNICAMP, Campinas, p 76-77.
- CORDEIRO, J. S. (2001) Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs). Capítulo 5, pg 121 a 142. In: ANDREOLI, C. V. (Coord). *Resíduos sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. RiMa, ABES, Rio de Janeiro, 282 p.:il. (Projeto PROSAB). ISBN: 85-86552-19-4.
- CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) (1999) *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, p. 1-19.
- COSTA, J. B. (2004) *Caracterização e constituição do solo*. 7ª. edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. ISBN: 972-31-0073-8.
- COSTA, M. L. (2007) Introdução ao intemperismo laterítico e à laterização. In: LICHT, O. A. B.; MELLO, C. S.



- B.; SILVA, C. R. (Ed) *Prospecção geoquímica: Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Sociedade brasileira de Geoquímica / CPRM, Rio de Janeiro, 788p.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. (2002) *Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. RiMa Editora, São Carlos, 245 p., il. ISBN – 85-86552-31-3.
- DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; FRAGIACOMO, P.; TROFINO, J. C.; VIUDES, M. A. P. (1999) Clarificação da água de lavagem de filtros de sistemas de filtração direta ascendente e desaguamento do lodo por centrifugação. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, ABES, Anais em Cd-Rom (II-084), p. 1555-1565.
- ECHART, C. L. & CAVALLI-MOLINA, S. (2001) *Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.3, p531-541, ISSN 0103-8478
- EMBRAPA (1997) *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2ª. ed., Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Rio de Janeiro.
- FARAH, E. M. (2001) *Heterogeneidade espaço-temporal das comunidades de peixes do reservatório do Descoberto, bacia do Paraná, Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília.
- FERREIRA, A. M. P. J. (2000) *Tese de Doutorado*, Universidade de Aveiro, Portugal.
- FETTER, C. W. (1994) *Applied Hydrogeology*. 3.ed. New York, Macmillan College Publishing Company, 691p.
- FÖRSTNER, U. (1989) Contaminated sediments. In: Bhattacharji, S., Fridman, G. M., Neugebauer, H. J. ... [et al.]. **Lecture notes in earth sciences**. Berlin: Springer-Verlag, V.21, p. 1-157.
- FREITAS-SILVA, F. H. & CAMPOS, J. E. G. (1995). Geologia do parque Nacional de Brasília-DF. **Boletim de Geociências do Centro-Oeste**, 18(1/2): 32-43, dezembro de 95.
- FUCK, R. A. (1994) A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: Simpósio de Geologia do Centro Oeste, 4, Anais, Brasília, SBG
- GEORGE, D. B.; BERK, S. G.; ADAMS, V. D.; TING, R. S.; ROBERTS, R. O.; PARKS, L. H.; LOTT, R. C. (1995) Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protozoan, fish, and marine bacterium. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, 29, 149-158.
- GONÇALVES, R. F.; BARRETO, E.; BRANDÃO, J., PIOTTO, Z. (1999) *Em Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*; Reali, M. A. P. (Coord.); ABES, Rio de Janeiro, p. 203-225.
- GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. C.; RESENDE, M. B. (1997) *Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulantes em lodos de estações de tratamento de água*. Anais em Cd-Rom, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu.
- GRADIENT (1991) SOUNDER: Program for Interactive Multi-Layer Resistivity Modeling. Missoula, Gradient Geology and Geophysics.
- GUERRA, R. C. & ANGELIS, D. F. D. (2005) Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v.72, n.1, p.87-91, jan./mar.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANE, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. (2005) **Tópicos Ci. Solo**, 345.



- HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R. SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. (2005) *Co-disposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental*. *Cerâmica* 51, 85-95.
- HUMEZ, N. & PROST, R. (1999) *A new experimental approach to study the long-term behavior of solidified/stabilized wastes*. **Chemical Speciation and Bioavailability**, nº 11, v. 1, p. 1-24.
- HYDE, J. E. & MORRIS, T.F. (2000) *Phosphorus availability in soils amended with dewatered water treatment residual and metal concentrations with time in residual*. **J. Environ. Qual.** 29: 1896-1904.
- IMRAY, P.; MOORE, M. R.; CALLAN, P. W.; LOCK, W. (1998) *Aluminium: Report of an International Meeting, 20-21 April 1995, Brisbane*. National Environmental Health Forum (Series: National Environmental Health Forum, Monographs, Metal Series nº 1), ISBN 0 642 28157 2.
- JERONYMO, S. & FUJIMURA, A. H. Y. (1998) *Dosagem de alumínio no soro de indivíduos sadios e em pacientes com insuficiência renal crônica mantidos ou não em tratamento dialítico*. **Jornal Brasileiro de Nefrologia**. 20 v., nº 2, p. 144-150.
- KOEFOED, O. (1979) *Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam, Elsevier, 276p.
- LEITE, L. L.; MARTIN, C. R.; HARIDASAN, M. (1992) *Anais do Simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas Degradadas*, Curitiba, Brasil.
- LENZI, E.; NOGAMI, E. M.; GALLI, D.; MORALES, M. M. (2005) *Estudo do lodo da ETA de Maringá (PR) e seu possível destino*. CD-ROM dos Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville.
- LICHT, O.A.B. (1998) *Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos*. CPRM, Rio de Janeiro, 216 p. il.
- LIMA, E. M.; ROCHA, O. G. F.; BARROS, J. R. C.; GURBUZATIK, L. T. C.; SILVA, M. L. R.; RESENDE, C. C. S.; GOULART, E. M. A.; DINIZ, J. S. S. (2001) *Intoxicação por alumínio na insuficiência renal crônica*. **Jornal Brasileiro de Nefrologia**. 23 v., nº 1, p. 8-17.
- LIMA, J. B. M. (2004) *Estudo de redes de monitoramento de qualidade das águas superficiais – O caso da bacia do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado, Depto de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 112p., PTARH.DM-69/2004.
- LOKE, M. H. (1997) *RES2DINV 3.2 FOR WINDOWS; Rapid 2D Resistivity & IP Inversion Using the Least-Squares Method*. Geoelectrical Imaging 2D & 3D.
- MACHADO, L. C. G. T.; PONTE, M. X.; LOPES, L. N. A.; PEREIRA, J. A. R. (2005) *Utilização de Resíduo de ETA como Insumo Agrícola*. CD-ROM dos Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cuiabá.
- MARTINS, E. S. (2000) *Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de Rególitos Lateríticos no Distrito Federal*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UnB, Brasília, 196 p.
- MELFI, A. J., CARVALHO, A. (1983) *Laterilisation Processes*. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 595 p.
- MERIAN, E.; CLARKSON, T. W. C. (1991) *Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance*. 2a. ed., VCH, Weinheim. ISBN 3-527-26521-X.
- MOREIRA, A. A.; SILVA, J. A.; CARDIM, A. C. S.; ARGOLLO, J. L.; SCHIAVETTI, A.; MARTINS, E. S. (2003) *Análise do material em suspensão da represa do Descoberto/DF e sua reutilização em áreas degradadas*.



- Resumo Expandido, IX Congresso Brasileiro de Geoquímica. p. 76-78.
- MOREIRA, R. C. A.; BOAVENTURA, G. R.; NASCIMENTO, C. T. C.; GUIMARÃES, E. M.; OLIVEIRA, R. P. (2007) **Geochimica Brasiliensis**, 21(1), 22.
- MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; ROCKTAESCHEL, F. M. M.; BOAVENTURA, G. R. B.; MOMESSO, A. M. (2007b) *Estudo geoquímico da disposição de lodo de ETA em área degradada*. Anais do XI Congresso Brasileiro de Geoquímica, Atibaia.
- MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. M.; LIMA, G. L. (2009) Estudo geoquímico da disposição de lodo de ETA em área degradada. Submetido à Revista **Química Nova**.
- NASCIMENTO, C. T. C. (2003) *Resistividade Elétrica e Radiação Gama Natural no Estudo de Solos sob Cerrado Nativo*. Tese de Doutorado, IG/UnB, Brasília.
- OLIVEIRA, R. C. & BOAVENTURA, G. R. (1998) *Determinação dos elementos terras raras em amostras geológicas por ICP/AES utilizando minicolumnas*. **Revista Brasileira de Geociências**, 28 (2): 169-172.
- PARSEKIAN, M. P. S. (1998) *Análise e proposta de Formas de Gerenciamento de Estações de Tratamento de Águas de Abastecimento Completo em Cidades de Porte Médio do Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 182 p.
- PAVANELLI, G. (2001) *Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Floculação e Sedimentação de Água com Cor ou Elevada Turbidez*. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, 216 p.
- PEREIRA, M. S. S. & REIS, B. F. (2002) *Determinação Espectrofotométrica de Alumínio em concentrados Salinos Utilizados em Hemodiálise Empregando Pré-Concentração em Fluxo*. **Química Nova**. 25 v., nº 6, p. 931-934.
- PHILIPPI Jr, A.; MALHEIROS, T. F. (2005) Saneamento e Saúde Pública: Integrando homem e ambiente. Capítulo 1, In PHILIPPI Jr, A. (ed). *Saneamento, Saúde e Ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável*. Ed Manole, Barueri, 842p. il. (Coleção Ambiental; 2), ISBN 85-204-2188-1.
- PINELLI, M. P. (1999) *Geoquímica de Águas e Sedimentos da Bacia do São Bartolomeu, Brasília-DF*. Dissertação de Mestrado do Instituto de Geociências da UnB, Brasília.
- PITT, R.; CLARK, S.; PARMER, K. (1994) *Potential groundwater contamination from intentional and nonintentional stormwater infiltration*. Diane Publishing, ISBN 07881 10594.
- REINHART, D. B.; CHOPRA, M. B.; SREEDHARAN, A.; KOODHATHINKAL, B.; TOWNSEND, T. G. (2003) *Design and operational issues related to the co-disposal of sludges and biosolids in Class I landfills*. DRAFT, University of Florida, Florida.
- RICHTER, C. A. (2001) *Tratamento de lodos de estações de tratamento de água*. Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 102 p.
- ROHDE, G. M. (2004) *Geoquímica Ambiental e Estudos de Impacto*. 2ª. edição. Editora Signus, São Paulo, 157 p.: il.
- SABOGAL-PAZ, L. P. & DI BERNARDO, L. (2005) *Aspectos conceituais relativos a seleção das tecnologias de tratamento e de disposição dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água*. CD-ROM do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Campo Grande (Resumo I-040).
- SALES, A. & CORDEIRO, J. S. (2001) *Imobilização da fase sólida de lodos de estações de tratamento de água*



- (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord). *Resíduos sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. RiMa, ABES, Rio de Janeiro, 282 p.:il. (Projeto PROSAB). ISBN: 85-86552-19-4.
- SANTOS, A. D. (2003) Estudo da distribuição de metais em sedimentos do Lago Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 88 p.
- SANTOS, R. M. M.; SOUZA, M. M.; MOREIRA, R. C. A.; HATTING, K. ARAÚJO, P. Q. (2007) *Monitoramento como instrumento de gestão de águas subterrâneas no Distrito Federal*. Resumos do XI Congresso Brasileiro de Geoquímica, Atibaia.
- SCHELLMANN, W. (1980) *On the geochemistry of laterites*. **Chemie der Erde.**, 45: 39-52.
- SEBRAE. (2004) *A questão ambiental no Distrito Federal*. Edição SEBRAE/DF, Brasília, 136p.: il.
- SILVA, L. A. M. (1998) *Dosagem de alumínio e manejo de intoxicação alumínica em pacientes com insuficiência renal avançada em programa de diálise*. *Comentário Editorial. J. Bras. Nefrol.* 20 v., nº 2, p. 167-170.
- SILVA, M. (2003) *Aplicação de lodo de estações de tratamento de água como coagulante no polimento final para remoção de fósforo em unidades de tratamento de esgoto*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-062ª/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 175p.
- SILVA, M. D. (2003b). *Caracterização do meio físico da região de Águas Lindas-GO: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 96 p.
- SOTERO-SANTOS, R. B.; ROCHA, O.; POVINELLI, J. (2005) *Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay*. **Water Research** 39, 3909-3917.
- SRINIVASAN, P. T. & VIRARAGHAVAN, T. (2002) *Characterization and concentration profile of aluminium during drinking-water treatment*. **Water SA**, v. 28, nº 1, janeiro, ISSN 0378-4738.
- STAUBER, J. L. et al. *Biodisponibilidade do alumínio na água de beber tratada com alume*. **Journal AWWA**. 91 v., nº 11, p. 84-93, 1999.
- STEVANATO, R.; FERREIRA, F. J. F.; PEGORARO, M.; TAVARES, F. S. (2003) *Imageamento 2-D e polarização induzida na detecção de pluma de contaminação no aterro sanitário de Itajaí-SC*. Anais do 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil.
- TACK, F. M. G. & VERLOO, M. G. (1999) *Single extractions versus sequential extraction for the estimation of heavy metal fractions in reduced and oxidized dredged sediments*. **Chemical Speciation and Bioavailability**, nº 11, v. 2, p. 43-50.
- TEIXEIRA, S. T.; DE MELO, W. J.; SILVA, E. T. (2005) *Sci Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62 (5), 498.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. (1985) *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 860p.
- THOMAZ SOCCOL, V.; CASTRO, E. A.; PAULINO, R. In: SANEPAR (2000) *Manual de Métodos para Análise Parasitológica em Reciclagem de Lodo*, Curitiba, p. 27-41.
- TOPOCART (2004) Ceilândia: Cascalheira ETA RD, Sondagem Rotativa. Volume I. Relatório Interno, 10 p.
- VAN NOSTRAND, R. & COOK, K. L. (1966) *Interpretation of Resistivity Data; Geological Survey Professional Paper 499*. Washington, United States Geological Survey, 310p.



ANEXOS



Resultados das análises químicas nas amostras de solo e lodo químico, bem como do Índice de Alteração Química (IAQ). Pela Topocart (2004), C corresponde a silte p/ argiloso e S a silte p/ arenoso. Os resultados correspondem as massas secas das amostras.

Pontos	Laudo	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	P (ppm)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CO (%)	MO (%)	IAQ	C	Q	I	Gt	Gb
S1 1		35,2	1,71	22,7	14,9	0,70	0,83	564,0	0,054	1,00	0,09	0,16	0,92	M	-	M	m	T
S1 2	C	38,6	1,35	22,8	14,9	0,70	0,83	752,8	0,054	1,18	0,12	0,21	0,92	M	-	M	m	-
S1 3	C	39,8	1,44	19,4	24,3	1,17	1,30	1152,0	0,056	1,59	0,05	0,08	0,87	M	T	M	m	-
S1 4	C	36,5	1,16	17,5	30,0	1,11	1,33	1263,2	0,056	1,39	0,05	0,08	0,86	M	T	M	m	-
S1 5	S	66,6	1,30	14,2	4,65	4,16	6,10	863,5	0,042	0,70	0,05	0,09	-	M	M	m	T	-
S1 6	S	49,7	1,02	14,7	13,0	1,05	1,23	863,2	0,052	1,20	0,03	0,06	0,86	M	M	m	T	-
S1 7	S	65,3	1,24	16,5	8,07	2,18	2,75	421,4	0,051	1,12	0,04	0,07	0,81	M	M	m	-	-
S1 8	S	66,7	0,97	15,1	9,30	1,79	2,16	640,6	0,050	1,06	0,08	0,13	0,82	M	M	m	-	-
S1 9	S	62,7	0,95	14,5	7,94	2,20	2,72	586,4	0,049	1,11	0,05	0,08	0,79	M	M	m	-	-
S1 10	S	70,7	0,90	16,0	4,21	0,70	0,59	349,2	0,049	1,25	0,03	0,05	0,89	M	M	m	-	-
S2 1		29,7	1,29	22,7	13,0	3,06	4,03	676,2	0,052	1,00	2,17	3,75	0,82	M	-	M	T	T
S2 2	C	35,9	1,33	20,9	12,5	0,89	0,83	679,5	0,056	1,45	0,08	0,14	0,90	M	-	M	T	-
S2 3	S	63,8	1,06	16,9	2,86	0,71	0,64	217,9	0,049	1,19	0,02	0,04	0,90	M	M	M	T	-
S2 4	S	85,4	0,58	8,7	3,18	0,43	0,36	173,1	0,036	0,52	0,08	0,13	0,90	M	M	M	T	-
S2 5	S	74,0	1,01	16,5	6,20	0,61	0,27	330,0	0,050	1,05	0,07	0,11	0,92	M	M	m	-	-
S2 6	S	71,3	0,98	17,2	6,14	0,61	0,56	310,9	0,046	1,02	0,07	0,12	0,91	M	M	m	-	-
S2 7	S	74,1	0,74	15,8	1,19	0,35	0,16	107,7	0,045	0,75	0,06	0,11	0,94	M	M	m	-	-
S2 8	S	77,8	0,77	12,6	3,25	0,42	0,22	176,7	0,046	0,97	0,07	0,12	0,91	M	M	m	-	-
S2 9	S	80,5	0,70	12,8	2,67	0,33	0,42	192,3	0,042	0,66	0,00	0,00	0,92	M	M	m	-	-
S2 10	S	80,7	0,83	15,2	3,82	0,59	0,51	166,4	0,048	1,03	0,11	0,18	0,91	M	M	m	-	-
S3 1		39,4	1,51	25,2	16,1	2,99	3,87	709,1	0,062	1,82	0,06	0,11	0,81	M	-	M	T	-
S3 2	C	45,8	1,62	23,1	13,4	1,09	0,81	519,4	0,063	1,99	0,04	0,08	0,89	M	-	M	m	-
S3 3	C	45,0	1,39	20,3	19,7	0,85	0,53	475,2	0,056	1,40	0,01	0,02	0,91	M	T	M	m	-
S3 4	C	52,2	1,50	23,6	10,3	0,92	0,44	560,5	0,059	1,75	0,02	0,03	0,91	M	T	M	T	-
S3 5	S	52,7	1,29	23,3	6,57	0,82	0,43	264,8	0,062	1,75	0,01	0,01	0,91	M	T	M	T	-
S3 6	S	57,2	1,26	20,1	7,27	0,95	0,72	310,0	0,057	1,49	0,00	0,00	0,90	M	T	M	-	-
S3 7	S	58,1	0,77	11,0	3,48	1,75	2,33	240,5	0,048	1,09	0,00	0,00	0,76	M	M	m	-	-
S3 8	S	62,1	0,94	14,5	6,19	1,14	1,03	210,4	0,056	1,41	0,03	0,06	0,85	M	M	m	-	-
S3 9	S	65,8	0,81	13,3	3,37	1,64	1,94	142,7	0,050	1,18	0,01	0,01	0,81	M	M	m	-	-
S3 10	S	63,6	0,82	14,4	2,53	0,97	1,08	102,2	0,051	1,06	0,08	0,13	0,87	M	M	m	-	-
Lodo (n=6)		30,8	1,18	34,9	11,0	1,02	1,21	1226,2	0,066	0,540	3,6	6,2	0,96					

C: caolinita; Q: quartzo; I: illita; Gt: goethita; Gb: gbsita. Constituintes: M=maior; m=menor; T=traço.



Resultados das análises de elementos químicos nas amostras de solo, lodo químico e coagulante. Os resultados estão expressos em partes por milhão, ppm, para as massas secas das amostras.

Amostras	Sr ppm	Cu ppm	Zn ppm	Y ppm	Be ppm	Ba ppm	Mn ppm	V ppm	Cr ppm	La ppm	Nd ppm	Ce ppm
S1 1	97,6	23,3	36,6	32,4	1,65	237	131	348	201	101,98	25,33	141,41
S1 2	70,3	22,7	43,4	25,3	1,72	215	187	239	117	75,79	18,35	89,62
S1 3	71,1	37,7	70,5	29,4	2,50	245	340	289	161	23,97	7,29	32,77
S1 4	53,1	53,6	76,4	28,0	2,57	244	225	347	264	21,39	9,47	30,37
S1 5	69,2	20,0	5,83	35,2	1,04	120	030	133	55,8	52,96	21,24	71,92
S1 6	45,7	21,7	58,4	30,1	2,05	188	265	179	75,2	11,52	6,39	13,12
S1 7	49,4	17,7	31,0	37,2	1,88	176	107	175	65,8	20,74	11,08	20,44
S1 8	40,7	21,4	38,7	22,4	1,59	167	117	156	69,2	38,83	15,03	39,22
S1 9	54,8	25,4	35,0	26,4	1,74	203	169	155	58,4	43,04	13,69	42,39
S1 10	33,2	15,1	13,2	22,9	1,49	198	065	115	50,9	29,99	12,55	22,68
S2 1	92,0	27,7	48,1	30,7	1,76	244	176	393	224	41,76	9,93	91,74
S2 2	95,8	29,9	52,3	33,1	2,10	277	138	340	198	50,89	11,25	68,03
S2 3	66,1	11,5	14,4	29,9	1,47	195	050	158	116	53,96	10,95	63,66
S2 4	17,6	6,51	8,78	15,2	0,88	72,5	040	68,1	33,6	9,04	0,87	13,37
S2 5	44,8	13,1	22,9	21,4	1,19	161	085	130	52,0	18,53	4,65	23,24
S2 6	30,0	11,0	6,56	18,8	1,29	159	052	176	108	12,78	3,40	19,32
S2 7	41,0	4,83	0,68	16,8	0,81	158	016	73,2	51,8	55,47	17,66	56,00
S2 8	34,0	8,03	7,73	20,9	1,07	162	040	107	47,5	32,93	13,28	33,89
S2 9	29,6	9,44	7,46	21,5	0,91	115	057	87,9	40,8	29,92	12,29	28,34
S2 10	27,8	8,29	9,43	19,0	1,37	161	064	103	59,8	14,69	7,48	17,16
S3 1	88,4	24,3	43,9	36,2	2,32	296	059	371	209	125,33	21,56	143,23
S3 2	73,0	18,5	47,9	38,9	2,43	301	080	302	155	59,90	9,82	65,11
S3 3	73,6	31,0	109	33,8	2,47	240	139	250	120	100,79	20,88	108,17
S3 4	60,6	22,0	38,9	36,5	2,45	289	084	257	136	64,43	18,45	78,28
S3 5	57,5	8,74	18,8	31,5	2,15	284	051	186	85,6	87,24	17,32	109,12
S3 6	56,0	9,05	13,9	23,7	1,46	282	037	171	77,5	84,73	3,54	66,48
S3 7	8,70	4,99	9,63	26,1	1,14	224	038	125	43,2	32,53	8,41	58,67
S3 8	15,9	13,2	11,3	21,6	1,32	278	040	131	62,3	49,97	23,81	54,75
S3 9	6,38	5,49	3,50	21,5	1,11	187	046	106	39,9	38,56	19,78	45,29
S3 10	8,17	1,26	0,72	22,4	1,03	158	024	84,9	38,8	39,20	18,58	41,61
Lodo (n=6)	5,34	23,9	34,6	2,11	0,96	24,1	200	187	85,8	1,65	2,05	21,13
Al ₂ (SO ₄) ₃ (n=2)	4,14	0,28	19,6	1,33	0,44	0,61	700	97,6	1,1	0,60	0,75	108,7



Resultados das análises de solo provenientes da perfuração a cada 3 metros do poço de monitoramento – P1

Poço - P1									
Profundidade	(m)	3	6	9	12	15	18	21	24
Umidade	(%)	2,17	1,71	1,16	0,07	0,03	0,46	0,05	0,21
Matéria Orgânica	g de Matéria orgânica/kg de TFSE	2,64	2,30			0,44	0,12		
	g de Carbono/kg de TFSE	1,53	1,34			0,26	0,07		
Cálcio trocável	cmolc de Ca ²⁺ /kg de TFSA	0,1978	0,0577	0,0577	0,0659	0,0742	0,0577	0,0577	0,0577
Dureza	cmolc de Ca ²⁺ + Mg ²⁺ /kg de TFSA	0,4532	0,1895	0,3049	0,2554	0,2802	0,4367	0,4944	0,4944
Magnésio trocável	cmolc de Mg ²⁺ /kg de TFSA	0,2554	0,1318	0,2472	0,1895	0,2060	0,3790	0,4367	0,4367
Sódio trocável	cmolc de Na ⁺ /kg de TFSA	0,0021	0,0031	0,0016	0,0008	0,0010	0,0031	0,0009	0,0007
Potássio trocável	cmolc de K ⁺ /kg de TFSA	0,0404	0,0525	0,0692	0,0967	0,1359	0,1161	0,1564	0,1086
Acidez Potencial	cmolc de H ⁺ + Al ³⁺ /kg de TFSA	0,90	1,30	1,80	1,10	1,00	0,90	0,90	0,90
Alumínio trocável	cmolc de Al ³⁺ /kg de TFSA	0,0000	0,0000	0,0000	0,7112	0,5080	0,5080	0,5080	0,4572
pH		5,75	5,75	5,60	5,70	5,80	5,80	5,80	5,75
CTC	cmolc/kg de TFSA	1,40	1,55	2,18	1,45	1,42	1,46	1,55	1,50
Na total	(%)	0,0097	0,0163	0,0205	0,0151	0,0142	0,0129	0,0129	0,0111
K total	(%)	0,0354	0,1384	2,0603	1,5380	1,4641	1,3636	1,2341	1,0849
Mn disponível	mg/kg	1,36	1,08	0,99	0,56	1,61	1,13	1,22	0,76
Pb disponível	mg/kg	2,45	2,18	2,06	1,86	2,70	3,84	3,31	3,91
Cu disponível	mg/kg	1,45	0,70	0,57	0,61	0,47	0,72	0,72	0,44
Zn disponível	mg/kg	1,00	0,44	0,23	0,30	0,05	0,05	0,50	0,25
P disponível	mg/kg	0,2	0,3	0,2	0,4	0,7	1,2	1,4	1,4
Al ₂ O ₃	(%)	20,10	13,66	20,49	14,85	15,34	13,10	14,85	14,31
SiO ₂	(%)	26,52	39,36	38,09	64,67	66,35	60,65	75,75	65,56
TiO ₂	(%)	1,11	1,44	1,49	0,98	1,03	0,91	1,02	0,96
CaO	(%)	0,30	0,04	0,18	0,12	0,17	0,15	0,39	0,20
MgO	(%)	0,22	0,05	0,39	0,22	0,33	0,33	0,43	0,37
Fe ₂ O ₃	(%)	45,06	32,15	18,87	5,00	4,94	5,14	5,91	5,82
Sr	mg/kg	49,70	57,84	113,53	39,80	31,47	31,93	27,24	27,90
Cu	mg/kg	20,28	31,32	25,55	15,50	11,18	17,86	17,55	14,83
Zn	mg/kg	55,58	48,99	41,43	16,07	18,69	31,47	19,86	22,82
Y	mg/kg	8,89	10,96	26,71	21,67	17,92	19,58	15,89	16,88
Zr	mg/kg	162,57	181,01	325,98	220,04	193,54	211,99	174,72	179,31
Be	mg/kg	0,81	0,90	1,56	1,05	1,09	1,15	1,00	0,97
Co	mg/kg	14,13	11,62	12,49	2,03	2,03	2,16	2,03	2,03
Ba	mg/kg	61,39	75,47	332,71	160,51	143,34	136,09	147,37	114,21
Mn	mg/kg	13,71	21,00	37,52	46,94	54,00	114,93	50,13	94,42
Pb	mg/kg	63,90	45,40	47,00	24,10	20,70	26,30	32,10	21,20
Al	(mg/kg)	106376	72301	108417	78578	81148	69333	78556	75697
Ti	(mg/kg)	6632	8642	8936	5885	6170	5462	6111	5741
Fe	(mg/kg)	315093	224852	131959	34949	34569	35963	41356	40673
Ca	(mg/kg)	2141	288	1271	847	1187	1105	2770	1396
Mg	(mg/kg)	1304	291	2350	1349	1961	1979	2563	2230
Si	(mg/kg)	123938	183930	177969	302193	310044	283410	353973	306372
Mn disp/Mn	(%)	9,9	5,1	2,6	1,2	3,0	1,0	2,4	0,8
Cu disp/Cu	(%)	7,2	2,2	2,2	3,9	4,2	4,0	4,1	3,0
Pb disp/Pb	(%)	3,8	4,8	4,4	7,7	13,0	14,6	10,3	18,4
Zn disp/Zn	(%)	1,8	0,9	0,6	1,9	0,3	0,2	2,5	1,1



Resultados das análises de solo provenientes da perfuração a cada 3 metros do poço de monitoramento à montante – P2

Poço - P2	Profundidade (m)									
Parâmetros	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
Umidade (%)	5,00	0,82	0,54	0,72	0,59	0,33	0,00	2,50	0,01	0,11
Mat Org (g/kg)	4,20	1,22	2,17			0,74	0,46			
C Org (g/kg)	2,50	0,71	1,26			0,43	0,27			
Ca tr (cmolc/kg)	0,9100	0,0412	0,0412	0,0412	0,0252	0,0168	0,0168	0,0168	0,0420	0,1596
Dureza (cmolc/kg)	1,5600	0,2884	0,4038	0,2802	0,2856	0,1764	0,2184	0,2856	0,3360	0,1680
Mg tr (cmolc/kg)	0,6500	0,2472	0,3626	0,2390	0,2604	0,1596	0,2016	0,2688	0,2940	0,0084
Na tr (cmolc/kg)	0,0129	0,0012	0,0009	0,0002	0,0002	0,0007	0,0004	0,0005	0,0006	0,0010
K tr (cmolc/kg)	0,0478	0,0628	0,0688	0,0574	0,0769	0,1076	0,1447	0,1300	0,1185	0,1012
Acidez Potencial (cmolc/kg)	1,1000	2,3000	2,7000	2,4000	2,2000	2,2000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000
Al tr (cmolc/kg)	0,6100	0,1524	1,2192	0,5080	0,7112	0,7112	0,6096	0,6096	0,5080	0,3048
pH	6,30	6,20	6,00	6,10	5,90	6,00	6,10	6,10	6,10	6,10
CTC (cmolc/kg)	2,70	2,65	3,17	2,74	2,56	2,48	2,06	2,12	2,16	1,97
Na (%)	0,0873	0,0167	0,0175	0,0146	0,0140	0,0132	0,0130	0,0117	0,0136	0,0112
K (%)	7,8219	0,9700	2,4568	2,0356	1,7122	1,8321	1,8164	1,4545	1,7158	1,3999
Mn disp (mg/kg)	5,21	0,80	0,60	0,39	0,55	0,74	0,62	0,67	1,00	1,12
Pb disp (mg/kg)	1,27	2,05	2,19	2,15	2,09	2,29	2,50	2,03	2,10	1,99
Cu disp (mg/kg)	0,47	0,16	0,49	0,36	0,36	0,34	0,42	0,34	0,34	1,66
Zn disp (mg/kg)	1,90	0,16	0,19	0,13	0,15	0,11	0,15	0,10	0,19	0,17
P disp (mg/kg)	0,30	0,20	0,10	0,10	0,40	0,70	0,80	0,90	1,00	0,70
Al ₂ O ₃ (%)	20,71	24,38	25,82	21,91	18,69	18,23	13,58	15,84	16,04	15,75
SiO ₂ (%)	37,64	32,03	45,64	58,75	66,19	65,26	65,90	71,75	70,69	65,89
TiO ₂ (%)	1,56	1,54	1,79	1,52	1,32	1,21	0,91	0,99	1,07	1,05
CaO (%)	0,05	0,22	0,13	0,27	0,16	0,38	0,38	0,30	0,30	0,31
MgO (%)	0,19	0,43	0,33	0,56	0,11	0,66	0,24	0,57	0,53	0,54
Fe ₂ O ₃ (%)	14,73	28,88	13,23	9,81	6,11	6,57	4,73	5,85	6,14	8,46
Sr (mg/kg)	92,83	82,89	68,84	33,75	43,92	27,87	24,92	21,67	27,78	17,47
Cu (mg/kg)	25,81	76,28	27,31	15,33	19,88	16,71	16,69	21,90	17,77	15,31
Zn (mg/kg)	53,80	66,39	41,47	32,78	31,61	23,63	21,41	19,56	20,15	15,10
Y (mg/kg)	25,92	17,90	26,87	23,03	25,49	22,41	17,52	17,31	19,16	17,08
Zr (mg/kg)	274,15	252,78	329,05	263,92	253,47	197,23	183,27	176,21	195,11	176,98
Be (mg/kg)	2,46	1,35	1,90	1,23	1,27	1,31	1,29	1,03	1,26	0,92
Co (mg/kg)	15,12	18,15	14,37	2,04	7,38	2,03	2,61	2,08	2,33	2,03
Ba (mg/kg)	179,60	161,23	254,03	168,04	170,40	169,50	158,43	120,11	161,18	118,37
Mn (mg/kg)	75,49	23,81	42,13	31,89	30,99	40,84	50,58	32,36	61,87	36,95
Pb (mg/kg)	40,90	50,10	39,80	33,20	26,40	15,90	18,20	23,50	23,40	20,80
Mnd/Mn	6,90	3,36	1,42	1,22	1,77	1,81	1,23	2,07	1,62	3,03
Cud/Cu	1,82	0,21	1,79	2,35	1,81	2,03	2,52	1,55	1,91	10,84
Pbd/Pb	3,11	4,09	5,50	6,48	7,92	14,40	13,74	8,64	8,97	9,57
Znd/Zn	3,53	0,24	0,46	0,40	0,47	0,47	0,70	0,51	0,94	1,13



Resultados das análises de solo provenientes da perfuração a cada 3 metros do poço de monitoramento – P3

Poço - P3									
Profundidade	(m)	3	6	9	12	15	18	21	24
Umidade	(%)	0,42	0,50	0,00	0,53	0,50	0,00	0,72	0,27
Matéria Orgânica	g de Matéria orgânica/kg de TFSE	0,77	1,80			0,74	1,06		
	g de Carbono/kg de TFSE	0,45	1,05			0,43	0,62		
Cálcio trocável	cmolc de Ca ²⁺ /kg de TFSA	0,0924	0,0672	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,7896
Dureza	cmolc de Ca ²⁺ + Mg ²⁺ /kg de TFSA	0,2352	0,2520	0,2604	0,3192	0,3864	0,2352	0,2268	1,1004
Magnésio trocável	cmolc de Mg ²⁺ /kg de TFSA	0,1428	0,1848	0,2436	0,3024	0,3696	0,2184	0,2100	0,3108
Sódio trocável	cmolc de Na ⁺ /kg de TFSA	0,0017	0,0009	0,0011	0,0007	0,0009	0,0012	0,0013	0,0051
Potássio trocável	cmolc de K ⁺ /kg de TFSA	0,0378	0,0532	0,0566	0,0585	0,1210	0,1054	0,1008	0,0519
Acidez Potencial	cmolc de H ⁺ + Al ³⁺ /kg de TFSA	2,60	2,10	2,00	1,90	1,10	1,10	0,90	0,00
Alumínio trocável	cmolc de Al ³⁺ /kg de TFSA	1,5240	1,3208	1,2192	1,1176	0,6096	0,5080	0,5080	0,0000
pH		5,95	5,70	5,70	5,75	6,00	6,00	5,85	6,00
CTC	cmolc/kg de TFSA	2,87	2,41	2,32	2,28	1,61	1,44	1,23	1,16
Na total	(%)	0,0142	0,0163	0,0178	0,0178	0,0132	0,0135	0,0129	0,0084
K total	(%)	1,6342	2,1985	2,2715	2,0806	1,8162	1,5955	1,5375	0,5898
Mn disponível	mg/kg	0,46	0,40	0,41	0,33	0,43	0,51	0,59	2,16
Pb disponível	mg/kg	1,47	1,91	1,83	2,16	2,05	2,68	2,25	1,55
Cu disponível	mg/kg	0,76	0,43	0,16	0,35	0,34	0,36	0,22	0,89
Zn disponível	mg/kg	0,32	0,05	0,05	0,09	0,08	0,14	0,07	0,18
P disponível	mg/kg	0,2	0,2	0,5	0,3	1,2	1,7	1,6	2,8
Al ₂ O ₃	(%)	31,95	22,46	23,24	21,61	16,21	15,07	14,42	7,09
SiO ₂	(%)	46,19	47,95	52,14	55,19	64,28	64,48	65,97	78,74
TiO ₂	(%)	1,78	1,51	1,56	1,34	1,12	1,03	0,93	0,58
CaO	(%)	0,23	0,17	0,29	0,21	0,27	0,21	0,21	0,21
MgO	(%)	0,43	0,47	0,23	0,58	0,44	0,41	0,48	0,26
Fe ₂ O ₃	(%)	6,22	8,17	7,13	7,43	4,83	5,62	4,92	4,95
Sr	mg/kg	95,18	49,92	49,89	44,79	28,60	36,98	25,13	14,87
Cu	mg/kg	19,07	14,91	14,23	14,98	12,62	23,03	11,41	21,39
Zn	mg/kg	45,13	28,75	26,27	26,41	18,00	25,98	17,16	26,15
Y	mg/kg	22,66	23,56	23,95	23,54	22,78	23,65	18,67	14,71
Zr	mg/kg	317,81	276,99	276,41	237,43	218,55	227,14	178,50	147,14
Be	mg/kg	1,93	1,71	1,77	1,63	1,30	1,56	1,30	0,83
Co	mg/kg	9,14	10,45	7,62	6,35	2,04	9,38	2,04	2,03
Ba	mg/kg	201,70	206,45	215,59	200,59	168,90	165,42	161,50	63,40
Mn	mg/kg	22,93	79,61	87,21	79,95	43,66	83,34	62,44	45,86
Pb	mg/kg	48,30	24,30	22,80	19,80	33,20	35,10	11,60	18,30
Al	(mg/kg)	169054	118847	122975	114365	85771	79745	76294	37519
Ti	(mg/kg)	10639	9056	9312	8022	6707	6172	5579	3494
Fe	(mg/kg)	43527	57128	49837	51937	33781	39295	34394	34623
Ca	(mg/kg)	1651	1223	2048	1524	1900	1480	1509	1525
Mg	(mg/kg)	2594	2853	1407	3464	2655	2457	2882	1594
Si	(mg/kg)	215845	224044	243637	257902	300377	301319	308264	367947
Mn disp/Mn	(%)	2,0	0,5	0,5	0,4	1,0	0,6	0,9	4,7
Cu disp/Cu	(%)	4,0	2,9	1,1	2,3	2,7	1,6	1,9	4,2
Pb disp/Pb	(%)	3,0	7,9	8,0	10,9	6,2	7,6	19,4	8,5
Zn disp/Zn	(%)	0,7	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	0,7



Resultados das análises de solo provenientes da perfuração a cada 3 metros do poço de monitoramento à jusante – P4

Poço - P4	Profundidade (m)									
Parâmetros	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
Umidade (%)	5	1,71	0,96	0	0,72	0,35	0,31	0,13	0,45	0,15
Mat Org (g/kg)	4,8	0,14	0,6			1,07	0,29			
C Org (g/kg)	2,8	0,08	0,35			0,62	0,17			
Ca tr (cmolc/kg)	1,98	0,0168	0,0588	0,042	0,0168	0,0168	0,0168	0,3696	0,0168	0,0168
Dureza (cmolc/kg)	2,73	0,2268	0,294	0,1932	0,3024	0,336	0,294	0,504	0,3024	0,3444
Mg tr (cmolc/kg)	0,75	0,21	0,2352	0,1512	0,2856	0,3192	0,2772	0,1344	0,2856	0,3276
Na tr (cmolc/kg)	0,0228	0,0006	0,0002	0,0004	0,0007	0,0007	0,0003	0,0008	0,0003	0,0003
K tr (cmolc/kg)	0,0461	0,0611	0,072	0,0779	0,0935	0,0865	0,1187	0,1293	0,1345	0,133
Acidez Potencial (cmolc/kg)	0	2,3	1,9	1,8	2,2	1,8	1,8	1,7	1,3	1,7
Al tr (cmolc/kg)	0,05	0,7112	0,4064	0,3048	0,6096	0,6096	0,4064	0,4064	0,3048	0,3556
pH	5,8	5,8	5,6	5,75	5,6	5,7	5,7	5,6	5,75	5,7
CTC (cmolc/kg)	2,8	2,59	2,27	2,07	2,6	2,22	2,21	2,33	1,74	2,18
Na (%)	0,0126	0,0167	0,0154	0,0149	0,0111	0,0101	0,0105	0,0121	0,0128	0,0137
K (%)	9,4459	2,3369	2,7955	2,4217	2,4144	1,5462	1,9852	2,3422	2,6355	2,9292
Mn disp (mg/kg)	7,58	1,32	0,61	1,13	0,96	0,61	1,05	2,75	1,82	1,9
Pb disp (mg/kg)	1,12	2,13	1,47	1,54	1,43	1,76	1,38	1,49	1,15	1,22
Cu disp (mg/kg)	0,64	0,3	0,48	0,36	0,48	0,72	0,63	0,58	0,56	0,24
Zn disp (mg/kg)	1,16	0,07	0,15	0,13	0,16	0,37	0,29	0,41	0,24	0,12
P disp (mg/kg)	0,3	0,8	0,6	1,2	1,3	1,6	1,7	1,9	3,4	2,6
Al ₂ O ₃ (%)	16,91	23,64	20,25	18,25	16,42	13,81	14,6	15,41	12,57	14,96
SiO ₂ (%)	32,73	39,69	54,71	59,47	58,83	72,71	66,72	69,47	61,78	63,89
TiO ₂ (%)	1,46	1,37	1,27	1,12	0,96	0,87	0,88	1,01	0,84	1
CaO (%)	0,21	0,27	0,25	0,43	0,25	0,34	0,24	0,3	0,37	0,27
MgO (%)	0,38	0,79	0,77	0,83	0,87	0,9	0,51	1,02	1,24	1,28
Fe ₂ O ₃ (%)	21,32	21,72	14,28	16,04	11,52	8,03	9,12	8,06	13,29	10,15
Sr (mg/kg)	50,08	51,57	39,03	45,15	53,75	58,37	42,25	42,84	50,24	44,68
Cu (mg/kg)	24,13	28,72	34,85	41	24,01	20,81	21,65	19,41	34,66	24,34
Zn (mg/kg)	44,93	50,87	75,71	89,67	52,61	31,83	31,72	44,41	69,07	49,49
Y (mg/kg)	24,49	21,63	19,05	20,97	22,08	17,19	14,98	17,53	16,88	16,22
Zr (mg/kg)	279,23	243,84	217,45	205,53	182,47	145,42	145,72	176,55	147,76	169,9
Be (mg/kg)	2,17	2,44	2,36	3,17	2,33	1,46	1,56	2,05	3,06	2,38
Co (mg/kg)	11,67	17,27	20,7	30,79	6,18	12,67	5,69	7,77	28,23	15,8
Ba (mg/kg)	151,51	207,19	246,91	238,39	279,25	200,76	240,44	281,09	404,07	397,51
Mn (mg/kg)	103,02	238,76	308,07	472,58	757,91	263,02	474,96	442,51	996,65	930,19
Pb (mg/kg)	40	18,5	28,7	29,8	14,1	15,5	13,2	13,6	30,1	22
Mnd/Mn	7,36	0,55	0,20	0,24	0,13	0,23	0,22	0,62	0,18	0,20
Cud/Cu	2,65	1,04	1,38	0,88	2,00	3,46	2,91	2,99	1,62	0,99
Pbd/Pb	2,80	11,51	5,12	5,17	10,14	11,35	10,45	10,96	3,82	5,55
Znd/Zn	2,58	0,14	0,20	0,14	0,30	1,16	0,91	0,92	0,35	0,24



Resultados das análises de solo provenientes da perfuração a cada 3 metros do poço de monitoramento LETA – P5

Poço LETA - P5	Profundidade (m)									
Parâmetros	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
Umidade (%)	14,80	1,42	0,23	1,66	0,12	0,20	0,70	0,95	3,81	0,14
Mat Org (g/kg)	64,20	1,34	0,53			0,95	0,53			
C Org (g/kg)	37,20	0,78	0,30			0,55	0,31			
Ca tr (cmolc/kg)	6,0100	1,0584	0,1260	0,0672	0,0504	0,0252	0,2016	0,0756	0,0168	0,0168
Dureza (cmolc/kg)	6,7700	1,4028	0,4704	0,3780	0,3864	0,2940	0,3360	0,2520	0,2520	0,3948
Mg tr (cmolc/kg)	0,7600	0,3444	0,3444	0,3108	0,3360	0,2688	0,1344	0,1764	0,2352	0,3780
Na tr (cmolc/kg)	0,0745	0,0002	0,0007	0,0005	0,0003	0,0002	0,0025	0,0006	0,0003	0,0002
K tr (cmolc/kg)	0,1448	0,0628	0,0702	0,0818	0,0784	0,0860	0,0813	0,0937	0,0937	0,0894
Acidez Potencial (cmolc/kg)	4,00	1,60	1,70	1,60	1,70	1,70	1,60	1,70	1,70	1,70
Al tr (cmolc/kg)	0,0500	0,2032	0,5588	0,5588	0,5080	0,4064	0,4064	0,5080	0,5080	0,6604
pH	5,70	4,70	5,30	5,75	5,60	5,50	5,50	5,60	5,65	5,70
CTC (cmolc/kg)	11,00	3,07	2,24	2,06	2,17	2,08	2,02	2,05	2,05	2,18
Na (%)	0,0658	0,0148	0,0148	0,0130	0,0127	0,0107	0,0127	0,0117	0,0136	0,0129
K (%)	5,2237	1,6540	1,7464	1,3722	1,1559	0,9913	1,3356	1,5530	1,7433	1,7213
Mn disp (mg/kg)	143,41	4,50	1,42	1,15	1,28	1,31	2,22	1,97	1,24	0,93
Pb disp (mg/kg)	0,52	2,09	2,36	2,53	2,46	3,26	2,29	2,33	2,41	2,69
Cu disp (mg/kg)	0,30	0,37	0,44	0,48	0,20	0,47	0,37	0,43	0,44	0,47
Zn disp (mg/kg)	3,57	0,28	0,26	0,31	0,15	0,25	0,21	0,21	0,16	0,49
P disp (mg/kg)	65,50	0,50	0,60	1,40	1,10	0,90	0,90	1,20	1,00	1,10
Al ₂ O ₃ (%)	24,42	20,04	20,75	15,90	15,02	16,48	16,70	14,78	15,19	15,36
SiO ₂ (%)	22,73	45,79	58,96	54,62	67,79	68,25	66,81	68,47	64,47	66,26
TiO ₂ (%)	0,88	1,26	1,01	0,92	0,89	0,89	1,00	0,90	0,85	0,89
CaO (%)	0,30	0,14	0,22	0,07	0,08	0,11	0,19	0,25	0,09	0,11
MgO (%)	0,07	0,35	0,30	0,15	0,24	0,24	0,34	0,32	0,34	0,38
Fe ₂ O ₃ (%)	7,89	13,72	10,68	10,17	8,57	10,28	9,24	8,26	7,57	7,53
Sr (mg/kg)	23,78	52,83	58,12	36,03	41,21	22,09	32,93	30,55	40,35	26,02
Cu (mg/kg)	22,59	27,34	18,32	16,57	14,47	10,84	12,27	12,01	18,57	16,29
Zn (mg/kg)	39,09	45,78	32,28	51,92	54,53	51,66	37,13	37,52	46,57	37,70
Y (mg/kg)	17,54	23,23	22,74	19,94	21,51	17,46	19,64	19,18	21,26	17,88
Zr (mg/kg)	195,08	287,44	247,46	198,44	186,93	151,04	181,47	178,37	199,25	164,48
Be (mg/kg)	0,84	2,42	1,88	2,51	2,75	2,31	1,95	2,25	2,36	1,97
Co (mg/kg)	2,06	17,22	15,62	18,77	11,89	19,06	13,55	13,77	19,27	9,48
Ba (mg/kg)	138,46	185,25	222,11	157,40	153,48	114,76	150,81	155,56	180,35	163,06
Mn (mg/kg)	505,84	185,58	123,01	231,51	253,93	270,84	201,51	189,39	209,83	188,28
Pb (mg/kg)	23,70	35,50	22,30	17,50	6,20	5,90	7,00	5,40	5,40	5,40
Mnd/Mn	28,35	2,42	1,15	0,50	0,50	0,48	1,10	1,04	0,59	0,49
Cud/Cu	1,33	1,35	2,40	2,90	1,38	4,34	3,02	3,58	2,37	2,89
Pbd/Pb	2,19	5,89	10,58	14,46	39,68	55,25	32,71	43,15	44,63	49,81
Znd/Zn	9,13	0,61	0,81	0,60	0,28	0,48	0,57	0,56	0,34	1,30



Aquisição de dados de resistividade, Wenner, $a = 1$ m, $R_a = 2 \cdot p \cdot a \cdot R$
Local: cascalheira na Ceilândia, próximo à QNP 5. Data: 24/02/2005 e 25/02/2005.

utm e-w	utm n-s	ponto	sp (mV)	ddp (mV)	ddp - sp (mV)	I(mA)	ddp/I (Ohm)	ra = 6,28*R
804910	8247070	1A	27	173	146	0,28	521	3275
804953	8247040	1B	12	524	512	2,02	253	1592
804995	8247013	1C	76	325	249	0,17	1465	9198
805037	8246986	1D	37	70	33	0,03	1100	6908
805078	8246957	1E	55	505	450	1,05	429	2691
805120	8246932	1F	-20	83	103	0,2	515	3234
804890	8247026	2A	40	700	660	0,92	717	4505
804931	8246999	2B	-2	440	442	0,64	691	4337
804971	8246972	2C	55	455	400	0,31	1290	8103
805013	8246945	2D	13	92	79	0,09	878	5512
805055	8246917	2E	-16	49	65	0,4	163	1021
805095	8246893	2F	-50	115	165	0,47	351	2205
804862	8246986	3A	-78	487	565	0,6	942	5914
804907	8246956	3B	-41	540	581	0,55	1056	6634
804944	8246932	3C	-5	335	340	0,18	1889	11862
804987	8246903	3D	-33	436	469	0,29	1617	10156
805029	8246876	3E	-28	65	93	0,05	1860	11681
805071	8246851	3F	-80	2	82	0,22	373	2341
804839	8246944	4A	-117	260	377	0,25	1508	9470
804881	8246919	4B	40	311	271	0,18	1506	9455
804920	8246890	4C	100	225	125	0,31	403	2532
804963	8246863	4D	-25	13	38	0,65	58	367
805005	8246835	4E	10	450	440	0,98	449	2820
805047	8246811	4F	106	119	13	0,18	72	454
804812	8246902	5A	220	833	613	0,69	888	5579
804854	8246874	5B	43	166	123	0,12	1025	6437
804895	8246850	5C	140	195	55	0,21	262	1645
804936	8246818	5D	-25	-15	10	0,6	17	105
804980	8246793	5E	83	97	14	0,4	35	220
805018	8246767	5F	-50	230	280	3,6	78	488
804787	8246856	6A	-32	246	278	2,9	96	602
804827	8246829	6B	60	64	4	0,56	7	45
804866	8246802	6C	-60	-22	38	2,9	13	82
804911	8246773	6D	-52	167	219	7,76	28	177
804952	8246746	6E	-15	425	440	0,55	800	5024
804993	8246719	6F	6	640	634	0,34	1865	11710
804758	8246811	7A	35	646	611	4	153	959
804802	8246786	7B	-36	91	127	0,23	552	3468
804840	8246759	7C	-54	-18	36	0,65	55	348
804885	8246733	7D	70	598	528	2,5	211	1326
804927	8246706	7E	48	187	139	0,22	632	3968
804967	8246679	7F	55	195	140	2	70	440
804730	8246768	8A	170	250	80	0,15	533	3349
804775	8246740	8B	44	317	273	0,29	941	5912
804813	8246714	8C	95	223	128	0,19	674	4231
804856	8246688	8D	-35	320	355	0,17	2088	13114
804898	8246661	8E	45	340	295	0,26	1135	7125
804939	8246633	8F	15	587	572	0,31	1845	11588



<i>utm e-w</i>	<i>utm n-s</i>	<i>ponto</i>	<i>sp (mV)</i>	<i>ddp (mV)</i>	<i>ddp - sp (mV)</i>	<i>I(mA)</i>	<i>ddp/I (Ohm)</i>	<i>ra = 6,28*R</i>
804702	8246720	9A	-70	180	250	0,35	714	4486
804744	8246691	9B	-83	305	388	0,58	669	4201
804784	8246666	9C	-18	118	136	0,08	1700	10676
804826	8246640	9D	-76	0	76	0,15	507	3182
804868	8246612	9E	-40	450	490	2,28	215	1350
804911	8246585	9F	8	175	167	0,34	491	3085
804676	8246678	10A	-25	230	255	1,53	167	1047
804720	8246649	10B	-10	318	328	1,26	260	1635
804759	8246624	10C	-65	20	85	0,21	405	2542
804800	8246597	10D	-105	-73	32	0,04	800	5024
804843	8246568	10E	35	372	337	0,19	1774	11139
804885	8246542	10F	15	145	130	0,6	217	1361



Hidrogeologia - aula de campo - 22/05/2004 - Sondagem Elétrica Vertical. Fonte: Laboratório de Geofísica da UnB.

SEV 1		SEV 2		SEV 3		SEV 4		SEV 5	
AB/2	ρ_a								
m	Ohm.m								
1	1440	1	5835	1	6982	1	14925	1	317
1,5	2007	1,5	6591	1,5	8684	1,5	16210	1,5	422
2	2435	2	6531	2	8926	2	12284	2	538
3	3233	3	5729	3	7733	3	10576	3	710
4	3520	4	6315	4	6641	4	8896	4	873
4	3534	4	6840	4	5415	4	8645	4	773
6	3977	6	6509	6	6056	6	4836	6	954
8	4916	8	6118	8	6225	8	3444	8	990
10	5091	10	7540	10	5427	10	2797	10	963
15	4358	15	6493	15	3627	15	2635	15	1109
20	3629	20	6048	20	3410	20	2784	20	1131
20	3132	20	4940	20	70	20	2703	20	95
30	2781	30	3934	30	88	30	2939	30	452
40	2631	40	3429	40	14	40	3057	40	400
60	2406	60	3497	60	26	60	3460	60	559
80	2497	80	3364	80	408	80	5778	80	999
100	2484	100	3494	100	793	100	1981	100	1381



Resultados das análises de solo

	Umidade	Matéria Orgânica	Carbono Orgânico	Cálcio Trocável	Dureza	Mg Trocável	Sódio Trocável	pH
Pontos	(%)	g de Matéria orgânica/kg de TFSE	g de Carbono/kg de TFSE	cmol _c de Ca ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Ca ²⁺ + Mg ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Mg ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Na ⁺ /kg de TFSA	
2a	5,57	32,09	18,62	0,75	1,68	0,93	0,01	5,30
2b	10,29	34,36	19,93	0,73	1,16	0,44	0,01	5,40
2c	6,26	33,66	19,52	0,23	0,76	0,53	0,02	5,20
2d	4,81	34,34	19,92	0,30	0,96	0,66	0,01	5,20
2e	7,92	1,57	0,91	0,09	0,70	0,61	0,01	5,50
2f	1,77	3,16	1,83	0,12	1,09	0,96	0,02	5,70
3a	7,11	37,51	21,76	0,12	0,70	0,58	0,01	5,30
3b	9,09	54,97	31,89	0,02	0,62	0,60	0,01	5,40
3c	8,23	40,22	23,33	0,01	0,66	0,65	0,02	5,20
3d	6,25	38,40	22,27	0,01	0,66	0,65	0,00	5,20
3e	5,30	36,81	21,35	0,01	0,82	0,81	0,01	5,00
3f	4,32	1,08	0,63	0,21	1,30	1,09	0,03	4,95
4a	10,39	34,51	20,02	0,02	0,28	0,26	0,01	5,40
4b	9,64	26,99	15,66	0,01	0,24	0,24	0,00	5,40
4c	17,48	51,46	29,85	1,05	1,36	0,31	0,00	5,60
4d	15,13	38,75	22,48	1,92	2,84	0,92	0,01	5,50
4e	9,50	15,40	8,93	0,03	0,58	0,55	0,01	4,90
4f	9,89	17,40	10,09	0,01	0,90	0,89	0,02	5,40
5a	8,40	22,70	13,17	0,78	1,05	0,27	0,03	5,50
5b	9,96	19,51	11,32	0,16	0,29	0,13	0,02	4,60
5c	7,22	24,87	14,43	0,24	0,60	0,36	0,01	4,50
5d	14,70	70,56	40,93	7,03	7,75	0,72	0,09	5,70
5e	5,24	23,37	13,55	0,18	0,48	0,29	0,01	4,35
5f	7,20	40,44	23,46	0,55	1,23	0,68	0,01	5,35
6a	0,86	15,32	8,89	0,91	1,39	0,48	0,03	5,80
6b	10,33	86,79	50,34	6,12	6,56	0,45	0,06	5,90
6c	8,28	44,20	25,64	1,13	1,43	0,29	0,03	4,95



	Umidade	Matéria Orgânica	Carbono Orgânico	Cálcio Trocável	Dureza	Mg Trocável	Sódio Trocável	pH
Pontos	(%)	g de Matéria orgânica/kg de TFSE	g de Carbono/kg de TFSE	cmol _c de Ca ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Ca ²⁺ + Mg ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Mg ²⁺ /kg de TFSA	cmol _c de Na ⁺ /kg de TFSA	
6d	7,13	1,68	0,97	0,61	0,88	0,27	0,01	4,60
6e	8,28	1,36	0,79	0,29	0,99	0,69	0,02	5,10
6f	6,89	6,81	3,95	0,41	1,00	0,59	0,16	5,15
7a	5,78	26,57	15,41	3,44	4,03	0,59	0,01	6,30
7b	7,68	27,46	15,93	0,45	0,77	0,33	0,01	5,50
7c	6,31	27,84	16,15	0,74	1,10	0,36	0,02	5,30
7d	5,92	5,90	3,42	2,19	3,05	0,86	0,02	6,45
7e	0,13	2,62	1,52	1,55	2,09	0,53	0,02	6,05
7f	7,11	2,82	1,64	0,07	0,35	0,28	0,01	4,95
8a	1,98	9,85	5,71	1,64	2,21	0,57	0,01	6,20
8b	0,88	0,54	0,31	0,04	0,54	0,50	0,02	5,15
8c	9,77	0,82	0,48	0,01	0,36	0,35	0,02	5,00
8d	2,99	0,55	0,32	0,05	0,74	0,69	0,02	5,90
8e	0,95	4,82	2,80	1,49	2,18	0,69	0,01	6,20
8f	6,94	6,84	3,97	0,01	0,26	0,25	0,01	5,40
9a	7,35	5,50	3,19	1,92	3,11	1,19	0,00	6,50
9b	9,92	1,06	0,61	0,06	0,39	0,33	0,02	5,20
9c	9,87	1,18	0,68	0,11	0,44	0,33	0,02	5,90
9d	7,96	3,80	2,21	0,47	1,02	0,55	0,00	5,10
9e	9,34	15,45	8,96	1,26	1,62	0,36	0,03	5,90
9f	6,81	6,26	3,63	0,08	0,43	0,35	0,00	5,50
10a	8,66	9,76	5,66	1,56	2,17	0,60	0,01	5,75
10b	9,40	14,52	8,42	1,34	1,86	0,52	0,20	6,20
10c	10,01	1,18	0,68	0,44	0,74	0,30	0,02	5,75
10d	4,65	3,78	2,19	0,47	0,89	0,42	0,03	5,55
10e	9,09	0,70	0,41	1,03	1,49	0,46	0,02	5,75
10f	9,10	10,74	6,23	2,22	2,64	0,42	0,05	6,00



Resultados das análises de solo

Pontos	Potássio Trocável cmolc de K ⁺ /kg de TFSA	Acidez Potencial cmolc de H ⁺ + Al ³⁺ /kg de TFSA	Alumínio trocável cmolc de Al ³⁺ /kg de TFSA	CTC cmolc/kg de TFSA	P mg de P/Kg de TFSA	Alumínio (%)	Cálcio (%)	Titânio (%)	Ferro (%)	Berílio mg/kg	Vanádio mg/kg	Manganês mg/kg
2a	0,09	5,53	0,20	7,31	0,40	17,24	0,18	0,93	12,36	36,85	230,89	86,01
2b	0,04	6,04	0,30	7,25	0,30	21,21	0,02	1,02	9,59	34,94	206,50	59,05
2c	0,07	6,04	0,61	6,88	0,60	20,69	0,02	0,98	10,93	37,06	220,37	51,33
2d	0,15	6,71	0,91	7,83	0,12	21,29	0,02	0,87	11,99	37,37	223,39	55,40
2e	0,04	1,34	0,30	2,09	0,40	13,14	0,03	0,69	9,54	36,33	172,45	43,55
2f	0,05	2,18	0,61	3,33	0,15	14,31	0,14	0,64	9,75	38,40	167,17	78,34
3a	0,04	6,37	0,61	7,12	0,24	10,15	1,34	0,75	8,92	37,40	179,37	48,68
3b	0,04	5,87	0,36	6,53	0,20	8,23	0,14	0,77	9,20	35,81	189,79	35,09
3c	0,05	6,20	0,61	6,93	0,16	7,94	0,26	0,94	10,04	36,10	209,32	46,37
3d	0,05	6,04	0,81	6,75	0,24	7,82	0,09	0,87	10,61	35,90	210,20	51,49
3e	0,06	7,54	1,12	8,43	0,45	31,11	0,26	1,38	24,55	38,19	224,15	52,26
3f	0,04	1,51	0,81	2,87	0,63	7,68	0,07	0,61	15,83	37,88	195,23	71,92
4a	0,04	5,20	0,30	5,53	0,53	43,46	0,11	1,11	15,20	34,88	248,18	74,28
4b	0,03	4,69	0,30	4,97	0,21	36,81	0,02	0,91	13,08	35,49	243,21	52,34
4c	0,04	5,03	0,05	6,43	4,87	40,49	0,27	0,62	6,40	32,13	132,47	302,43
4d	0,08	3,86	0,05	6,79	11,57	37,76	0,40	0,63	10,19	33,40	176,07	567,45
4e	0,04	2,85	0,51	3,48	2,21	36,12	0,12	0,75	15,37	35,60	222,61	233,58
4f	0,03	1,84	0,91	2,79	0,93	36,29	0,08	0,87	10,84	35,30	169,57	88,13
5a	0,23	3,19	0,05	4,49	0,16	29,17	0,12	0,92	12,07	36,21	196,73	53,09
5b	0,02	3,19	0,05	3,52	0,10	36,04	0,25	0,91	11,33	35,28	184,19	45,09
5c	0,03	3,69	0,05	4,32	4,00	36,12	0,23	0,69	14,20	36,60	191,17	276,00
5d	0,16	4,02	0,05	12,03	78,95	24,92	0,02	0,51	7,25	33,64	123,73	406,68
5e	0,04	4,19	0,20	4,72	9,39	34,84	0,06	0,66	17,67	37,20	190,06	175,48
5f	0,19	3,69	0,05	5,12	9,78	29,73	0,16	0,59	12,09	36,68	165,70	200,87
6a	0,10	2,18	0,05	3,70	0,21	8,04	0,02	0,75	18,61	38,43	249,80	101,30
6b	0,10	4,69	0,05	11,42	1,94	7,25	0,02	0,67	6,28	34,89	145,47	364,39
6c	0,05	4,86	0,05	6,37	4,74	7,24	0,07	0,58	13,15	36,08	184,77	292,68



	Potássio Trocável	Acidez Potencial	Alumínio trocável	CTC	P	Alumínio	Cálcio	Titânio	Ferro	Berílio	Vanádio	Manganês
Pontos	cmolc de K ⁺ /kg de TFSA	cmolc de H ⁺ + Al ³⁺ /kg de TFSA	cmolc de Al ³⁺ /kg de TFSA	cmolc/kg de TFSA	mg de P/Kg de TFSA	(%)	(%)	(%)	(%)	mg/kg	mg/kg	mg/kg
6d	0,05	1,68	0,51	2,62	0,25	7,04	0,13	0,58	16,27	36,58	185,82	95,67
6e	0,04	1,51	0,61	2,55	0,48	5,76	0,08	0,74	9,55	36,27	134,08	96,05
6f	0,44	2,01	0,20	3,62	2,61	7,13	0,08	0,62	13,52	36,42	148,69	116,81
7a	0,05	2,18	0,05	6,27	0,24	9,58	0,30	0,77	12,46	36,96	199,16	49,32
7b	0,05	4,69	0,20	5,52	0,17	9,20	0,07	0,92	12,63	36,49	213,90	68,90
7c	0,04	3,35	0,05	4,51	3,94	9,47	0,04	0,99	11,98	36,93	223,48	216,10
7d	0,05	0,00	0,05	3,13	0,23	7,28	0,19	0,60	18,33	37,14	204,37	48,47
7e	0,03	0,00	0,05	2,15	0,39	7,04	0,02	0,69	14,82	38,90	181,88	153,79
7f	0,02	1,68	0,71	2,05	0,14	7,74	0,18	0,65	10,43	36,35	147,73	88,25
8a	0,07	0,84	0,05	3,13	0,29	6,03	0,75	0,60	7,35	38,71	107,26	93,99
8b	0,03	2,35	1,63	2,94	0,10	5,87	0,63	0,95	5,24	39,07	150,41	29,92
8c	0,03	1,84	1,22	2,25	0,10	6,67	0,59	0,61	10,19	35,61	137,89	59,59
8d	0,03	1,17	0,61	1,97	0,26	6,38	0,55	0,51	18,66	38,21	195,51	135,17
8e	0,06	0,00	0,05	2,25	1,47	8,00	0,52	0,22	33,07	38,98	51,37	1129,29
8f	0,02	1,51	1,12	1,80	0,11	7,23	0,52	0,69	19,88	36,51	267,37	70,74
9a	0,03	0,00	0,05	3,14	0,90	4,57	0,37	0,66	13,59	36,49	206,38	32,73
9b	0,06	1,17	0,71	1,65	0,06	3,53	0,68	0,92	6,81	35,18	149,16	25,83
9c	0,03	1,01	0,91	1,50	0,55	3,55	0,62	0,92	3,57	35,58	120,07	21,37
9d	0,05	0,84	0,20	1,91	0,30	3,83	0,35	0,46	15,96	36,21	205,88	36,32
9e	0,07	1,51	0,36	3,23	0,48	4,50	0,52	0,53	11,13	35,55	132,00	172,18
9f	0,04	1,17	0,71	1,65	0,20	3,25	0,37	0,52	12,48	36,57	135,42	74,37
10a	0,08	1,34	0,05	3,60	0,24	11,51	0,55	0,46	7,53	36,03	124,60	46,30
10b	0,06	1,51	0,05	3,63	0,28	13,26	0,75	0,63	12,72	35,76	202,80	62,02
10c	0,04	1,68	0,51	2,47	0,29	9,93	0,85	0,29	18,30	35,34	151,63	74,70
10d	0,07	1,34	0,05	2,32	0,15	11,67	0,79	0,42	21,27	37,59	201,59	142,32
10e	0,05	0,17	0,05	1,73	2,12	8,49	0,75	0,23	16,34	35,82	68,33	297,86
10f	0,05	0,67	0,05	3,40	6,63	5,89	0,68	0,31	17,51	35,48	147,21	83,95



Resultados das análises de solo

	Cobalto	Níquel	Cobre	Zinco	Zircônio	Bário	Chumbo	Manganês Extraível	Cobre Extraível	Chumbo Extraível	Zinco Extraível
Pontos	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
2a	10,73	1,07	19,13	27,63	640,50	1,14	26,39	28,26	1,32	2,04	3,02
2b	10,82	1,01	6,22	19,27	600,51	1,08	22,22	10,50	0,47	2,02	1,69
2c	9,86	1,07	7,36	18,55	664,92	1,15	29,47	5,78	0,40	2,21	0,67
2d	9,16	1,08	12,78	23,14	636,69	1,15	29,11	3,48	0,67	2,33	0,64
2e	9,55	1,05	22,16	26,78	663,48	1,12	72,20	0,53	0,43	1,47	0,74
2f	9,85	6,58	26,68	33,67	700,26	1,19	47,03	1,19	0,96	2,08	1,39
3a	7,73	1,08	8,57	23,51	510,83	1,16	21,01	10,24	0,61	1,95	0,86
3b	7,31	1,04	3,90	20,88	457,42	1,11	22,27	9,80	0,29	1,83	0,52
3c	9,14	1,04	7,84	38,36	646,26	1,12	33,93	6,22	0,38	1,96	1,00
3d	9,19	1,04	10,39	30,61	630,86	1,11	27,61	6,70	0,38	2,17	1,05
3e	10,10	1,10	13,42	31,41	675,72	1,18	27,94	5,26	0,62	1,86	0,46
3f	12,38	12,09	34,39	57,33	754,97	1,17	73,15	1,80	0,38	1,94	1,24
4a	14,60	4,77	12,35	38,24	703,76	201,22	24,96	3,95	0,39	1,53	0,41
4b	9,77	1,03	4,35	28,33	534,46	155,60	22,56	4,37	0,20	1,15	0,30
4c	7,87	8,95	23,48	69,05	425,79	293,42	22,16	85,84	0,27	0,52	4,56
4d	8,49	6,00	25,49	59,19	552,80	315,51	29,23	111,21	0,37	0,52	3,33
4e	14,62	11,32	35,93	58,87	691,69	374,70	31,29	16,77	0,84	0,73	4,28
4f	12,92	6,48	21,90	43,55	683,98	628,79	50,14	1,34	0,49	0,86	1,60
5a	9,99	1,05	10,87	24,14	582,54	1,12	25,63	3,27	0,66	0,95	3,23
5b	8,26	1,02	3,51	16,98	584,95	1,09	26,33	2,48	0,20	0,76	0,47
5c	7,40	1,69	24,75	40,51	568,20	1,13	31,23	69,78	0,74	0,52	3,32
5d	6,49	6,20	26,43	50,45	446,52	1,04	22,33	151,46	0,28	0,52	3,63
5e	10,78	7,52	31,21	44,27	694,68	1,15	24,54	15,94	0,90	0,52	8,91
5f	8,78	5,33	31,62	45,49	546,67	1,13	29,59	42,10	0,71	0,52	5,72
6a	10,24	3,30	27,28	43,98	729,68	1,19	35,28	13,39	0,44	1,00	1,79
6b	7,51	1,01	21,68	67,38	433,92	1,08	14,81	111,95	0,38	0,52	2,47



	Cobalto	Níquel	Cobre	Zinco	Zircônio	Bário	Chumbo	Manganês Extraível	Cobre Extraível	Chumbo Extraível	Zinco Extraível
Pontos	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
6c	6,97	1,26	34,27	52,22	573,51	1,12	27,18	96,42	0,97	0,52	3,46
6d	7,57	1,06	14,91	32,32	598,90	1,13	37,20	15,34	0,63	1,53	1,15
6e	8,14	3,60	10,18	43,76	640,23	1,12	16,57	7,62	0,47	1,29	2,17
6f	11,53	10,34	29,08	43,16	694,66	1,13	31,76	11,74	0,88	1,44	3,84
7a	7,31	1,07	9,59	26,92	503,06	1,14	25,60	17,29	0,88	1,67	4,31
7b	9,71	1,06	7,24	22,33	617,05	1,13	27,35	9,91	0,21	1,49	0,62
7c	10,92	1,07	13,03	32,45	660,08	1,14	22,66	74,10	0,54	0,52	1,31
7d	7,65	1,07	28,87	35,54	751,36	1,15	42,42	5,95	0,74	0,99	1,15
7e	12,42	12,89	29,76	48,09	752,67	1,20	35,07	10,85	0,43	1,37	1,18
7f	9,87	4,30	19,23	59,25	647,88	1,12	27,20	6,14	0,27	1,35	0,97
8a	11,84	12,36	32,41	63,66	741,13	1,20	32,94	11,50	0,66	2,05	2,20
8b	8,38	1,13	17,83	69,39	990,91	1,21	53,64	0,41	0,40	1,12	2,38
8c	7,49	1,03	20,04	40,53	703,33	1,10	45,82	0,32	0,67	1,14	0,95
8d	11,29	11,21	29,73	73,12	772,13	1,18	19,69	0,32	0,20	0,93	0,72
8e	34,46	83,23	41,71	150,72	270,55	1,20	25,75	3,62	0,32	0,52	0,64
8f	7,41	1,06	31,96	42,06	479,10	1,13	60,46	0,32	0,88	1,44	0,96
9a	6,13	1,73	28,98	51,29	532,88	1,13	37,18	8,26	0,48	1,06	1,48
9b	7,14	1,02	20,94	47,21	675,31	1,09	39,80	0,68	0,35	0,83	1,55
9c	7,49	1,03	23,80	49,56	726,44	1,10	46,32	0,34	0,20	0,72	0,19
9d	5,28	1,05	18,19	39,33	523,83	1,12	36,24	2,75	0,46	1,35	0,90
9e	10,97	12,13	27,00	46,00	647,05	1,10	36,88	2,86	1,98	1,69	2,36
9f	9,42	6,16	23,78	47,45	656,52	1,13	43,78	0,80	0,48	1,36	0,92
10a	3,95	5,85	20,74	1420,22	532,07	941,67	40,30	20,40	1,03	1,33	3,20
10b	6,64	1,03	15,73	1931,50	440,68	971,24	26,32	13,76	0,45	0,80	1,31
10c	6,99	5,19	22,94	2993,03	529,96	2680,10	45,67	0,59	0,41	1,06	0,68
10d	9,53	12,29	31,29	2950,85	575,14	2858,25	34,42	4,84	0,46	1,20	0,85
10e	17,41	32,06	30,90	90,28	491,83	60,16	23,93	5,26	0,80	1,32	2,76
10f	7,27	8,45	25,93	58,92	517,25	1,10	39,43	8,36	1,98	10,82	11,39



Resultados das análises de águas superficiais da bacia do Lago Descoberto e de drenagens e nascentes localizadas nas proximidades da cascalheira. Data: maio/2004.

Pontos	Lago Descoberto					Cascalheira				Tributários do Descoberto							
	A	B	C	D	E	Córrego do Meio	Drenagem Montante cascalheira	Nascente 1	Nascente 2	Chapadinha	Coqueiro	Descoberto jusante	Descoberto montante	Lajinha	Pedras	Rocinha	Rodeador
pH	6,900	7,000	7,000	7,000	7,100	7,020	6,800	6,130	5,330	7,000	6,800	6,900	6,500	6,600	6,500	6,400	6,400
Turbidez (uT)	15,400	15,500	14,400	14,700	16,400	7,360	5,740	4,230	0,820	11,400	19,400	15,000	7,400	6,600	5,300	5,200	11,300
Condutividade (uS/cm)	17,260	17,530	17,710	16,940	17,610	39,500	8,170	3,410	5,910	38,300	15,100	17,900	9,500	13,500	22,300	16,700	12,500
Nitrato (mg N/L)	0,129	0,115	0,080	0,098	0,079	0,764	0,080	0,031	0,031	0,793	0,077	0,104	0,059	0,089	0,156	0,250	0,124
Alumínio (mg/L)	0,231	0,206	0,205	0,167	0,237	0,159	0,169	0,111	0,067	0,271	0,438	0,348	0,209	0,267	0,231	0,105	0,292
Sódio (mg/L)	0,590	0,620	0,700	0,570	0,630	4,100	0,900	0,100	0,100	2,600	0,500	0,600	0,300	0,500	0,900	0,700	0,500
Potássio (mg/L)	0,340	0,320	0,390	0,300	0,320	0,400	0,200	0,100	0,200	0,800	0,600	0,600	0,300	0,200	0,200	0,300	0,400
Amônia (mg N/L)	0,179	0,022	0,085	0,020	0,103	0,040	0,031	0,205	0,020	0,183	0,020	0,165	0,040	0,045	0,053	0,267	0,165
N total (mg N/L)	0,685	0,683	0,694	0,812	0,765	1,384	0,330	0,451	0,091	1,420	0,745	0,644	0,469	0,341	0,641	0,639	0,641
Cloreto (mg/L)	1,470	1,120	0,980	1,080	0,880	2,960	1,330	0,920	1,530	2,950	1,150	1,500	0,950	1,200	1,350	0,800	1,400
Cálcio (mg/L)	1,490	1,330	1,330	1,370	1,290	2,610	0,690	0,820	0,230	3,200	1,440	1,700	1,000	1,500	2,320	1,580	1,560
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	7,970	8,680	11,800	6,960	7,780	12,520	3,230	1,210	0,810	12,500	7,000	8,200	4,000	5,600	6,500	5,800	4,100
Cor (uH)	40,000	60,000	60,000	40,000	40,000	15,000	15,000	25,000	4,000	30,000	60,000	26,000	30,000	17,000	18,000	15,000	30,000
CO ₂ livre (mg/L)	2,007	1,736	2,360	1,392	1,236	2,391	1,024	1,794	7,577	2,500	2,219	2,065	2,530	2,813	4,111	4,618	3,264



Resultados das análises de águas superficiais das drenagens na proximidade da cascalheira. Data: junho de 2005.

<i>Pontos</i>	<i>pH</i>	<i>Turbidez (uT)</i>	<i>Condutividade (uS/cm)</i>	<i>Nitrato (mg N/L)</i>	<i>Al (mg/L)</i>	<i>Na (mg/L)</i>	<i>K (mg/L)</i>	<i>Amônia (mg N/L)</i>	<i>N total (mg N/L)</i>	<i>Cloreto (mg/L)</i>	<i>Ca (mg/L)</i>	<i>Alcalinidade (mg CaCO3/L)</i>	<i>Cor (uH)</i>	<i>CO2 livre (mg/L)</i>	<i>Sulfato (mg/L)</i>	<i>Sr (mg/L)</i>	<i>La (mg/L)</i>
Córrego do Meio	7,020	7,360	39,500	0,764	0,159	7,510	0,520	0,040	1,384	2,960	2,610	12,520	15,000	2,391	2,08	0,0145	<0,0069
Drenagem Montante cascalheira	6,800	5,740	8,170	0,080	0,169	3,820	0,140	0,031	0,330	1,330	0,690	3,230	15,000	1,024	1,94	0,0049	<0,0069

<i>Pontos</i>	<i>Y (mg/L)</i>	<i>Ti (mg/L)</i>	<i>V (mg/L)</i>	<i>Mg (mg/L)</i>	<i>Fe (mg/L)</i>	<i>Si (mg/L)</i>	<i>Ni (mg/L)</i>	<i>Zr (mg/L)</i>	<i>Cu (mg/L)</i>	<i>Cr (mg/L)</i>	<i>Mn (mg/L)</i>	<i>Ba (mg/L)</i>	<i>Co (mg/L)</i>	<i>Zn (mg/L)</i>	<i>Cd (mg/L)</i>	<i>P (mg/L)</i>	<i>Mo (mg/L)</i>
Córrego do Meio	0,0044	0,0228	0,0058	0,246	0,3733	1,499	<0,0288	0,0227	0,0048	0,0048	0,0055	0,0154	0,0441	0,004	0,0151	0,0811	<0,0136
Drenagem Montante cascalheira	0,0032	0,0167	<0,0033	<0,0126	0,4465	1,446	<0,0288	0,015	0,0021	<0,0037	0,0043	<0,0023	0,0272	0,004	<0,0023	0,0538	<0,0136



Resultados das análises de lodo químico e sulfato de alumínio férrico.

Amostras		Umidade	Zn Extraível	Mn Extraível	Cu Extraível	Pb Extraível
		(%)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Lodo	1	18,8	1,61	81,70	0,14	0,31
	2	18,4	1,48	79,82	0,13	0,31
Lotes de Sulfato de Alumínio Férrico	5629		7,66	84,72		2,17
	5649		6,71	115,51		1,02
	1170407		5,85	63,80		3,52
	9450		6,36	60,35		3,37
	9480		7,05	78,76		2,62
	9437		7,42	90,45		2,80
	9366		12,28	115,18		1,79
	2020407		7,42	99,84		3,58
	1280307		10,73	118,05		2,07
	2270307		7,01	77,30		3,46
	2200307		7,58	83,70		3,25
	9363		7,52	94,29		2,32
	9349		11,73	101,34		2,40
	2180307		8,96	72,03		3,03
	9241		9,15	93,23		2,83
	9346		10,30	63,48		3,13
	2060307		11,71	111,04		2,26
	9314		8,52	72,60		3,05
9344		8,01	77,93		3,29	
2080407		10,53	109,84		2,17	



RESULTADOS DAS ANÁLISES PARASITOLÓGICAS REALIZADAS EM DUPLICATAS DAS
AMOSTRAS COMPOSTAS DO LODO DA ETA - RD

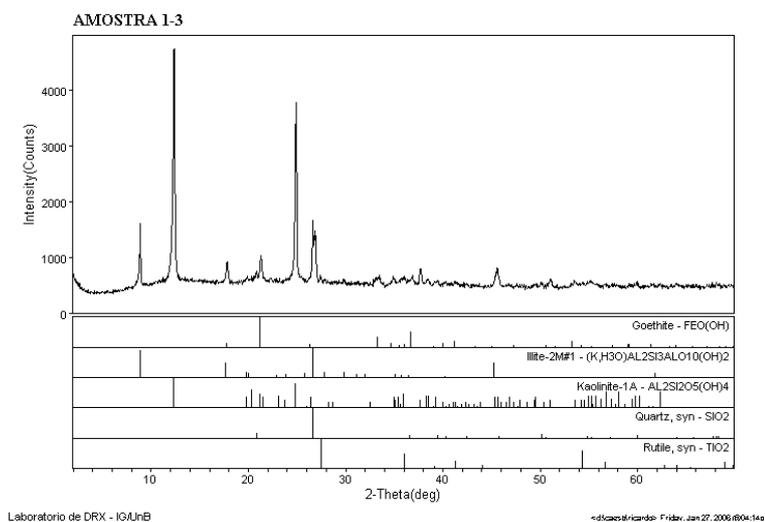
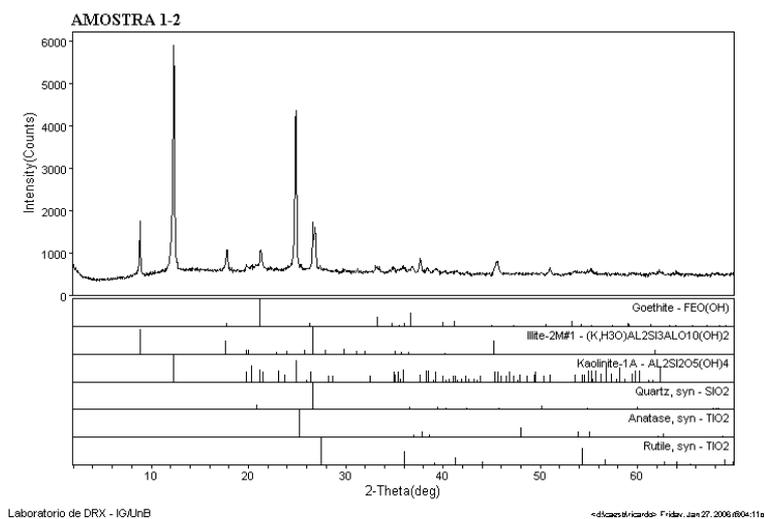
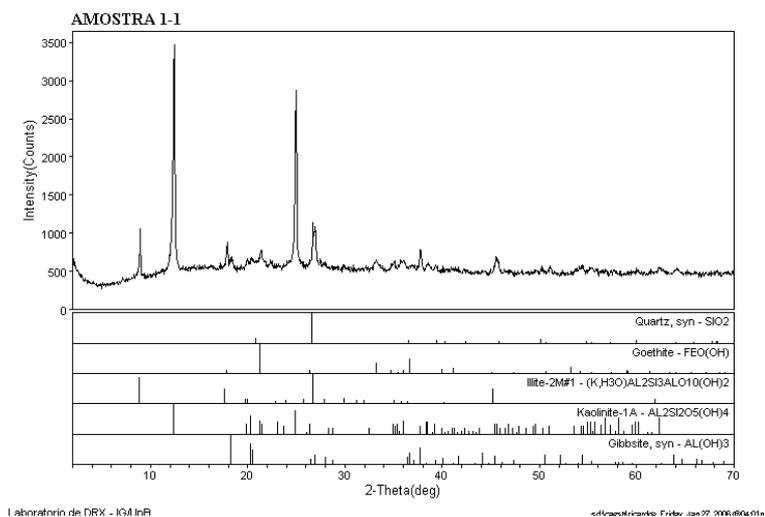
Data	pH	Sólido Seco (%)	<i>Ascaris sp.</i>		<i>Hymenolepis diminuta</i>		<i>Trichuris sp.</i>		<i>Toxocara sp.</i>		Total	(% viabilidade)
			ovos viáveis	ovos inviáveis	ovos viáveis	ovos inviáveis	ovos viáveis	ovos inviáveis	ovos viáveis	ovos inviáveis		
14/04/2003	6,29	32,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/05/2003	6,77	32,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/06/2003	7,11	30,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/08/2003	6,24	27,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06/10/2003	7,30	33,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09/02/2004	6,36	33,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/05/2004	7,30	33,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/07/2004	6,99	28,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/09/2004	6,60	26,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/12/2004	6,62	23,24	0	0,34	0,69	0	0	0	0	0	1,03	66,99
21/03/2005	6,93	35,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/04/2005	6,51	27,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/06/2005	6,83	29,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/07/2005	6,79	28,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/08/2005	6,73	25,63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/09/2005	6,01	23,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/10/2005	5,96	23,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/11/2005	5,02	21,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/12/2005	5,84	26,87	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0,3	0
23/01/2006	5,96	27,18	0,29	0	0	0	0	0	0	0	0,29	100
21/02/2006	5,82	23,91	0	0,34	0	0	0	0	0	0	0,34	0
22/05/2006	5,95	33,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/08/2006	6,93	23,82	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0,67	100
28/08/2006	6,63	27,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/10/2006	6,50	27,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/12/2006	6,78	33,97	0	0,24	0	0	0	0	0	0	0,24	0
15/01/2007	6,20	35,16	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0,2	100
12/02/2007	7,20	35,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/05/2007	6,98	32,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/06/2007	7,36	29,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/2007	7,39	28,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/11/2007	6,30	34,90	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0,2	100
08/10/2007	6,40	31,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/08/2007	8,10	28,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/01/2008	7,20	34,70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/04/2008	6,90	30,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

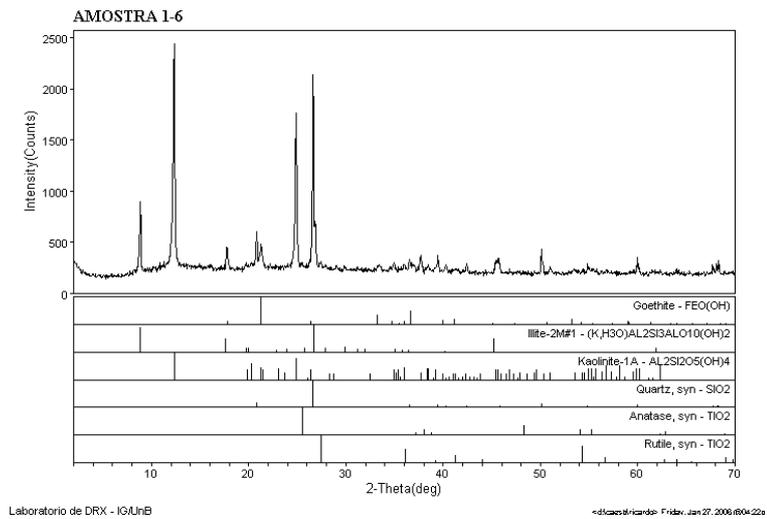
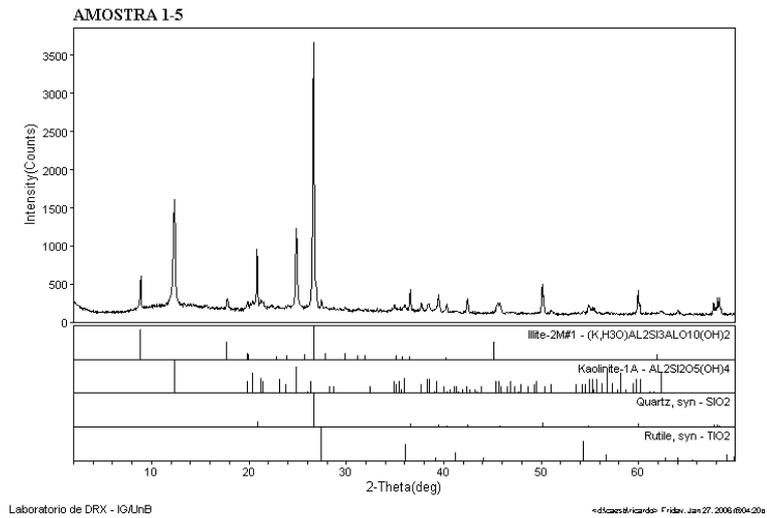
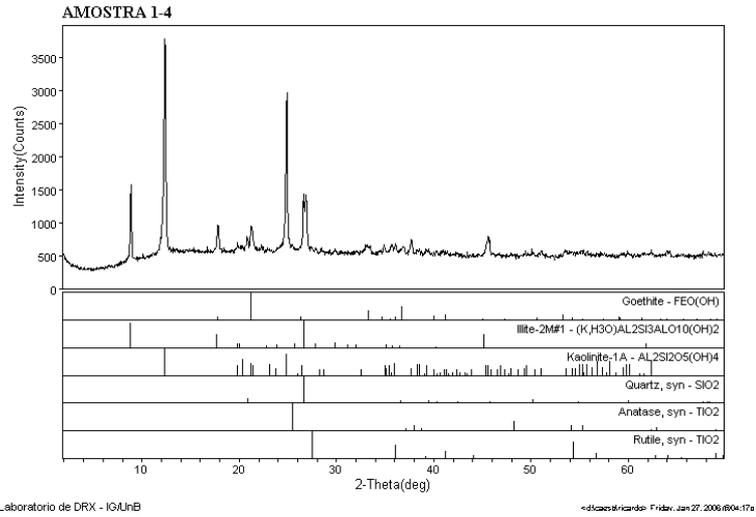
Onde: Ovos por grama de matéria seca. Método Yanko, 1987; Thomaz Soccol, V.; Castro, E. A.; Paulino, R. In: SANEPAR (2000) Manual de Métodos para Análise Parasitológica em Reciclagem de Lodo, Curitiba, p. 27-41.

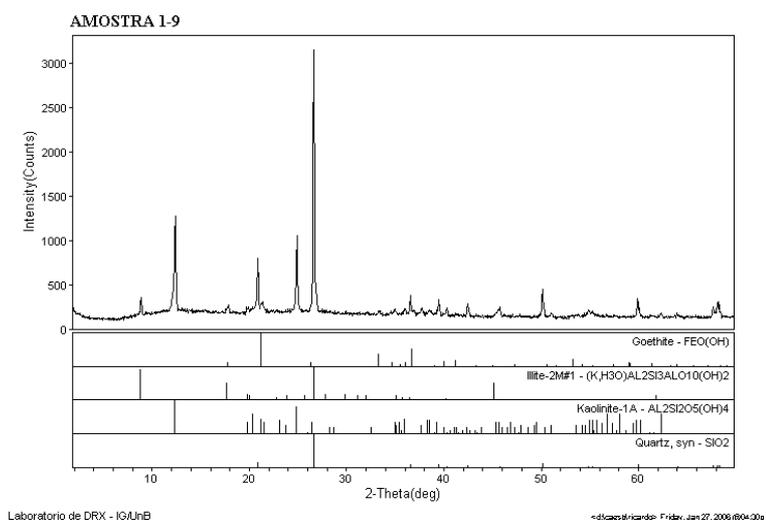
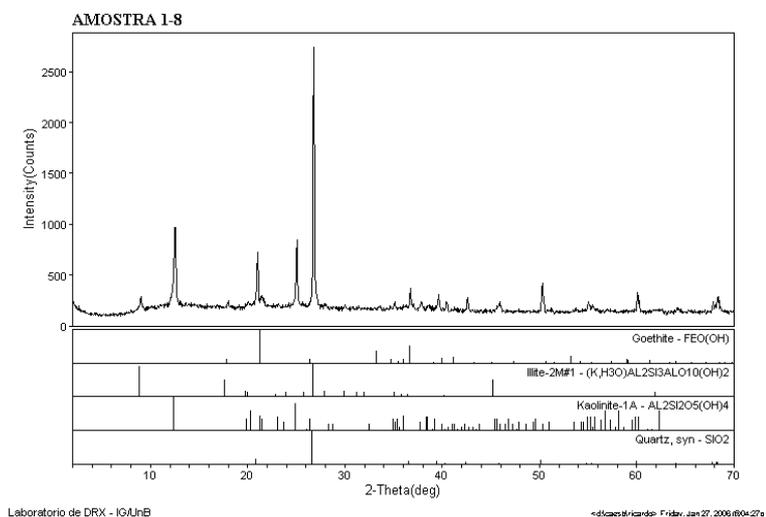
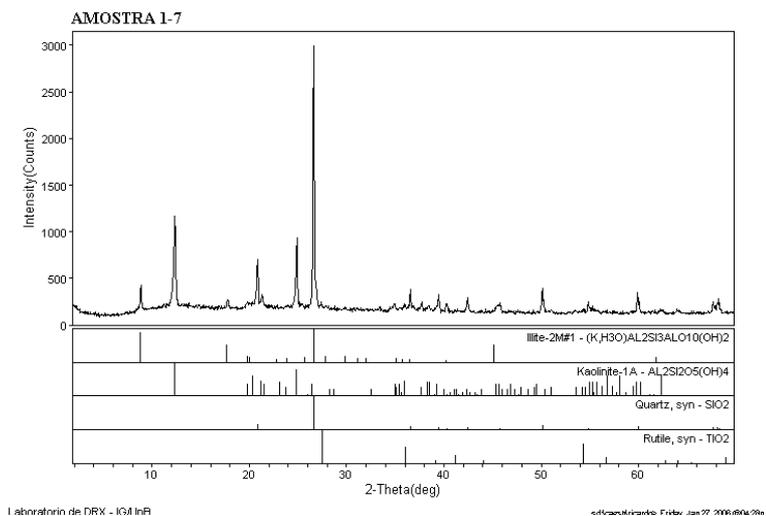
Fonte: Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal.

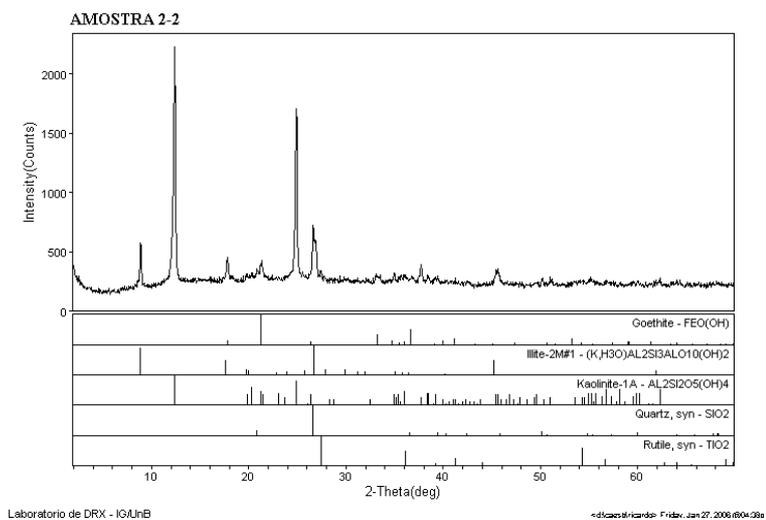
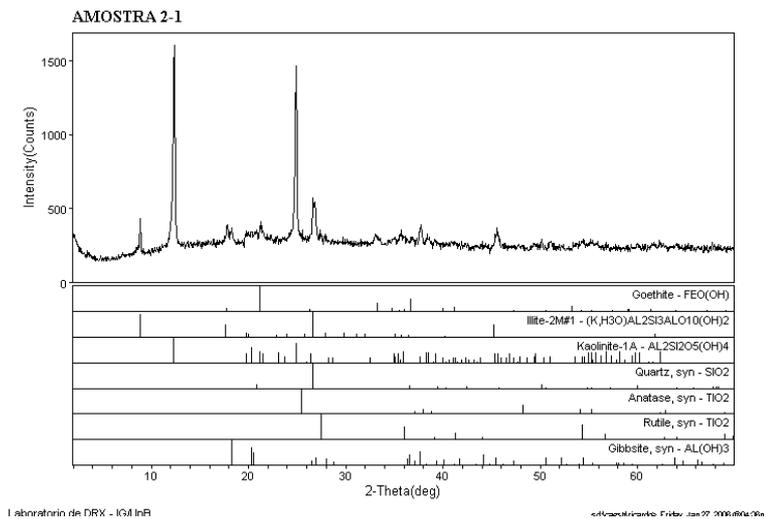
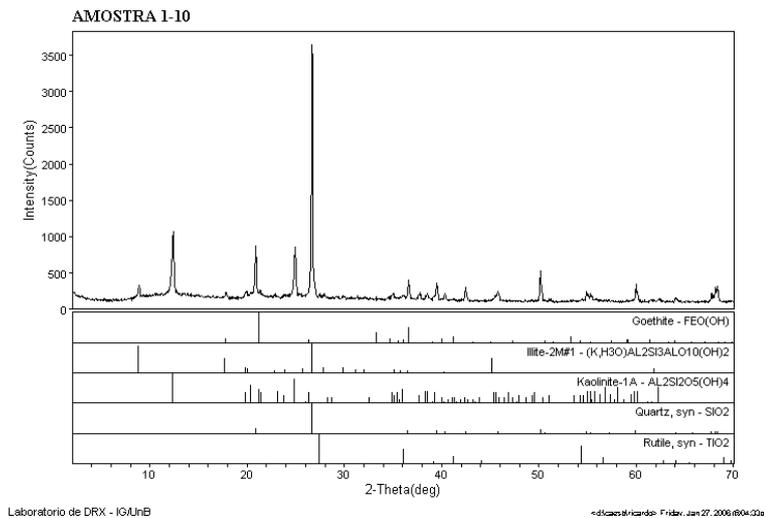


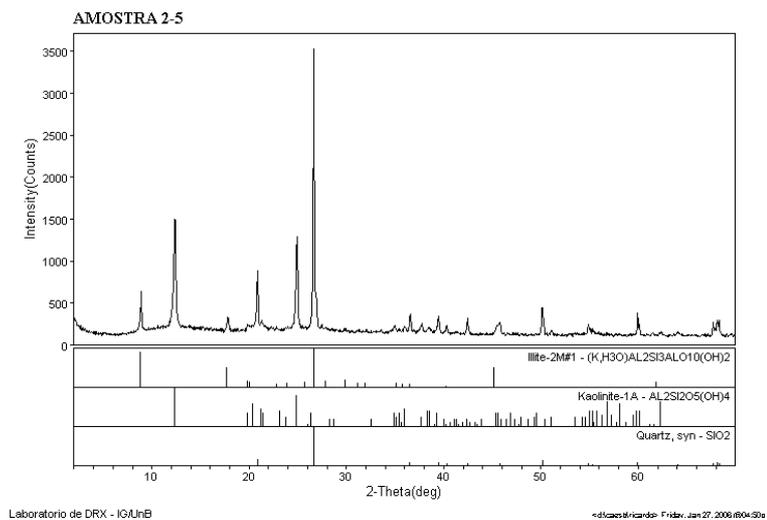
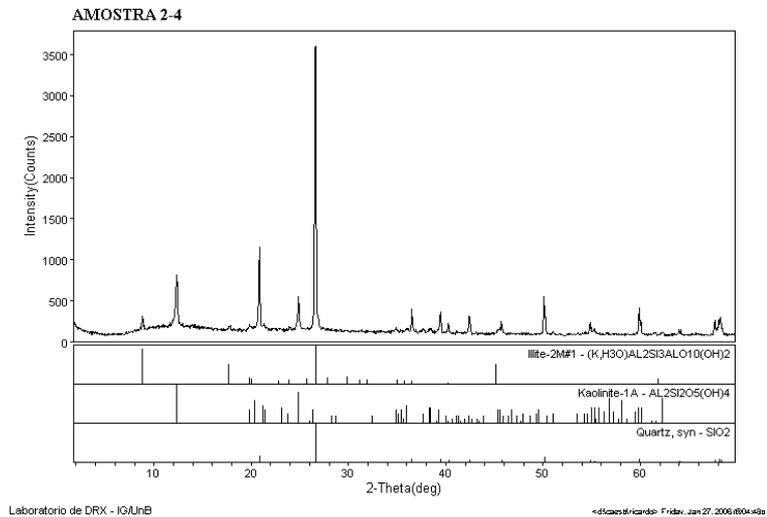
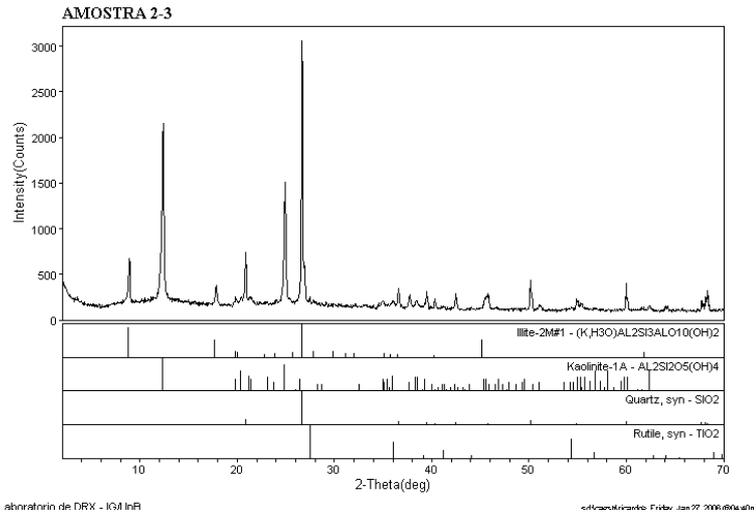
Difratogramas das amostras de solo provenientes das perfurações metro a metro em três pontos de sondagem.
Data: Outubro de 2004.

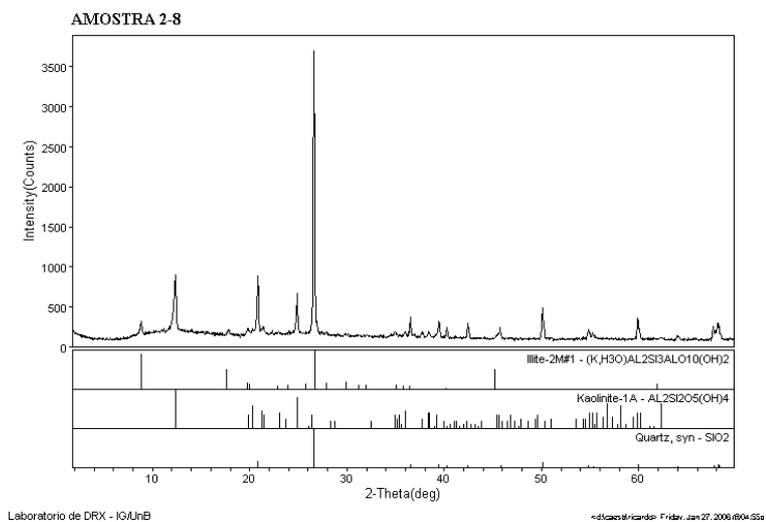
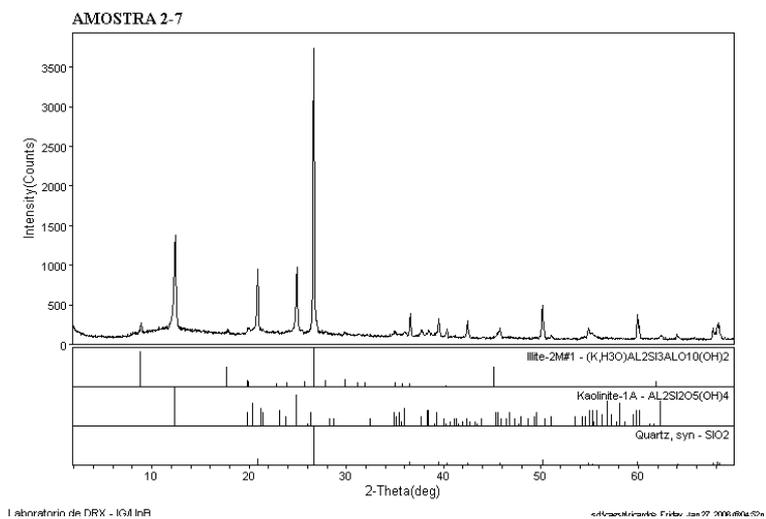
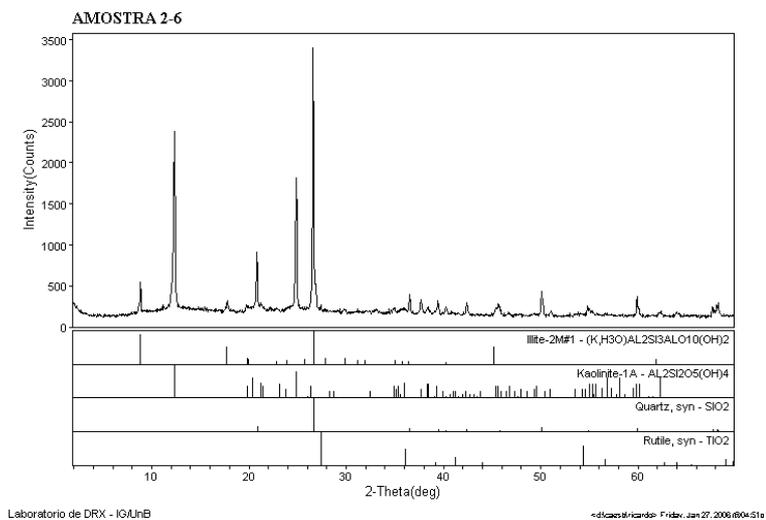


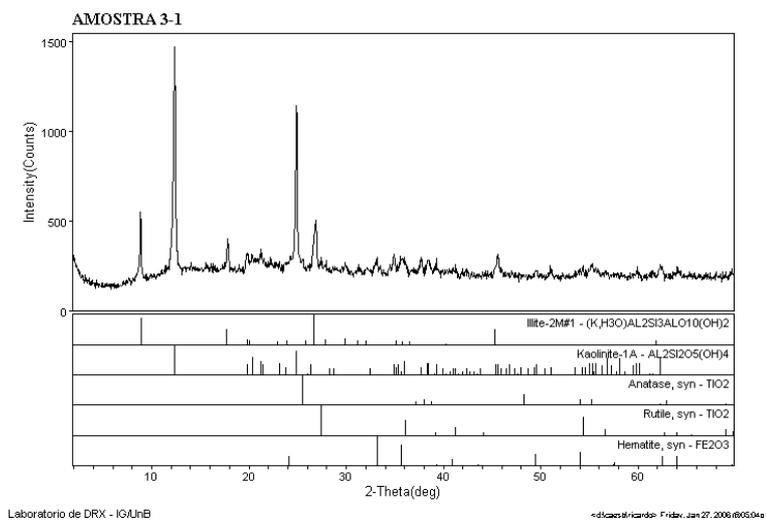
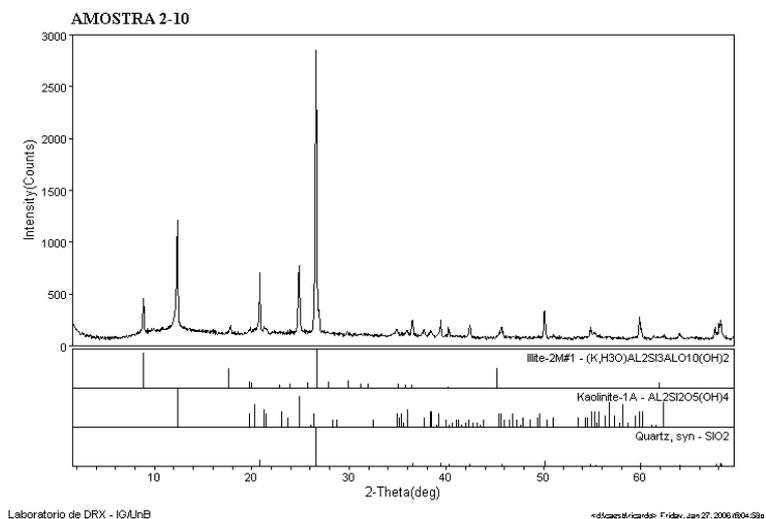
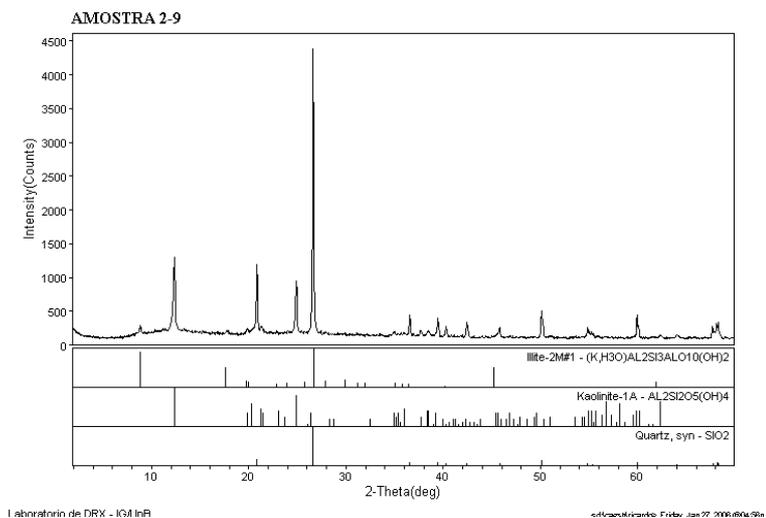


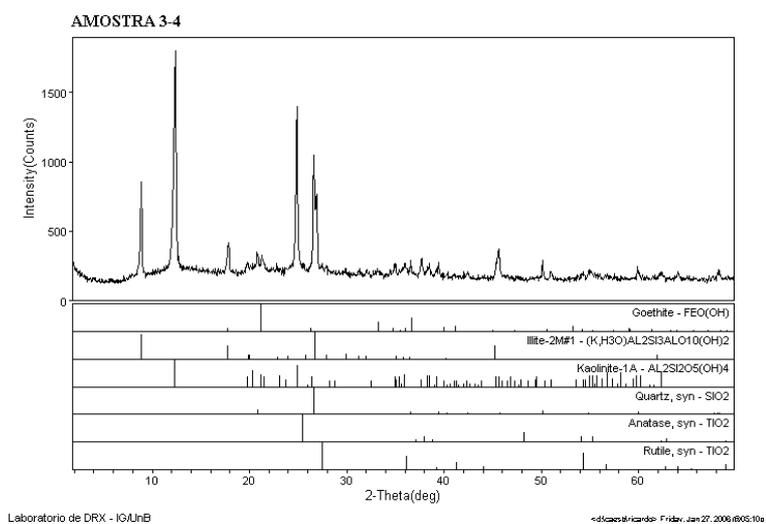
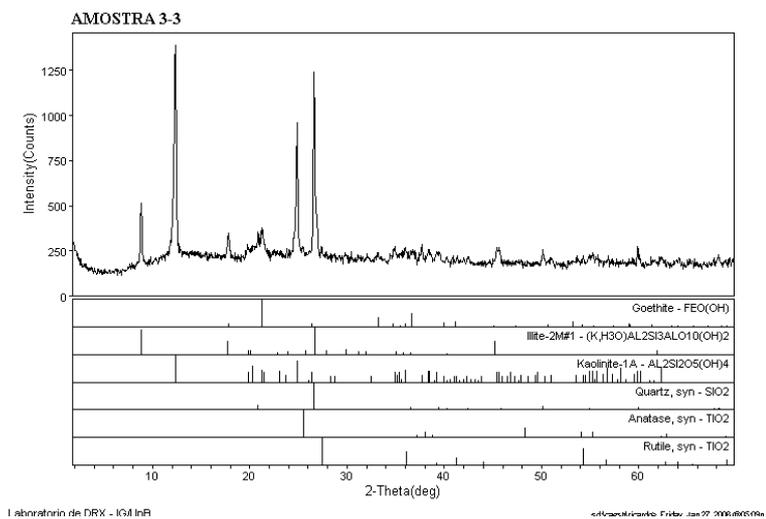
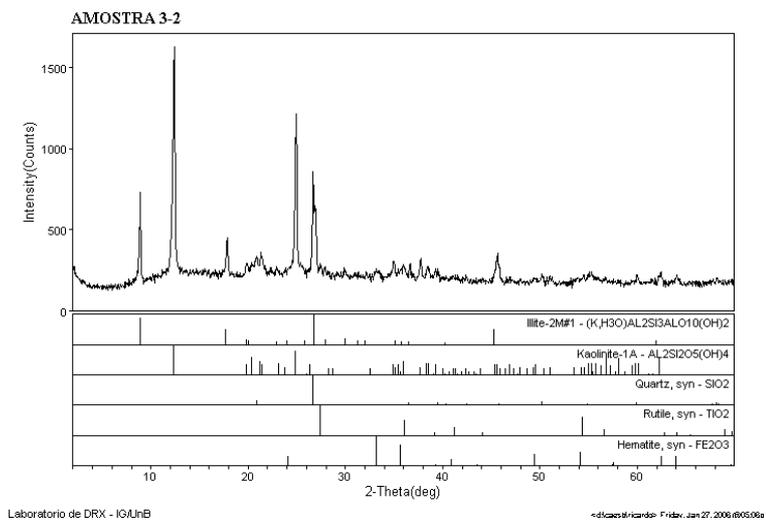


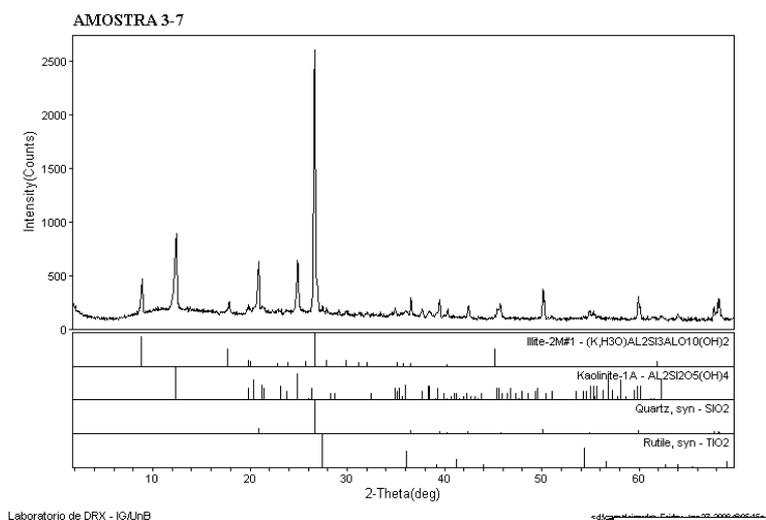
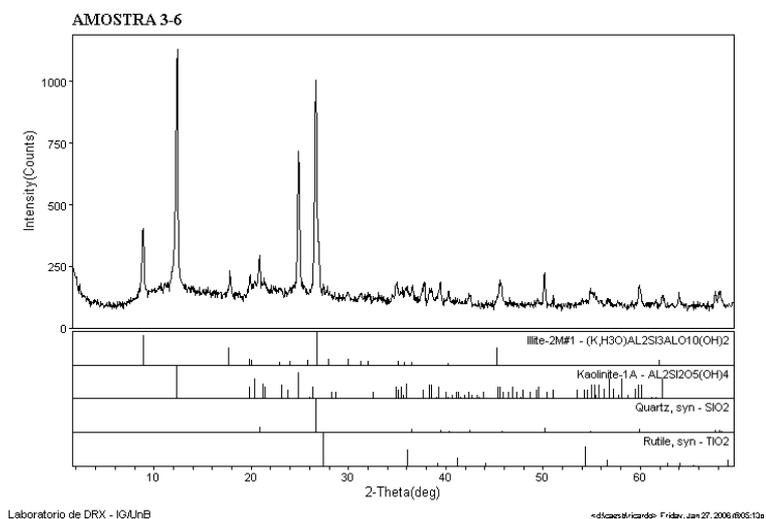
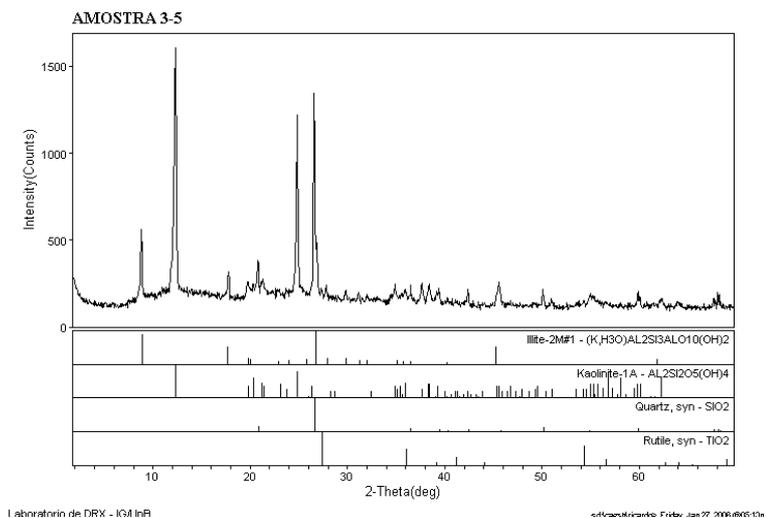


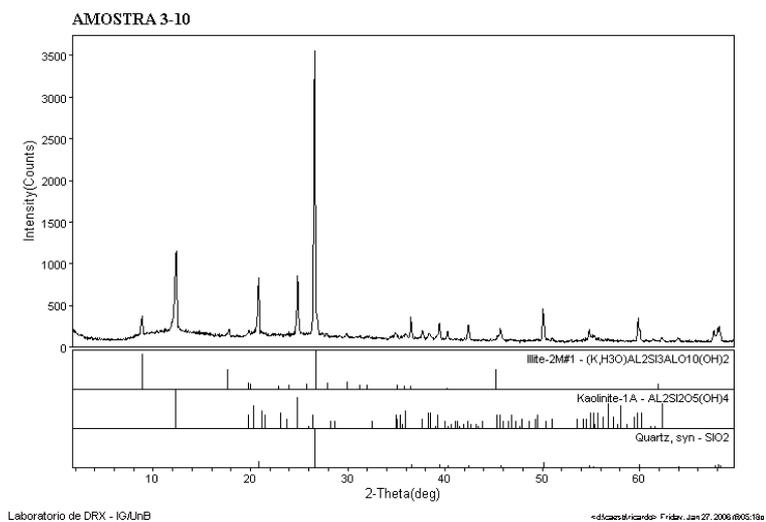
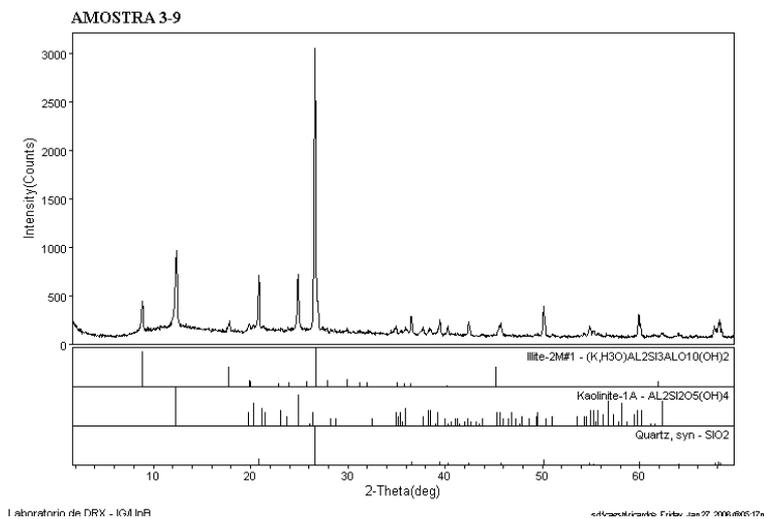
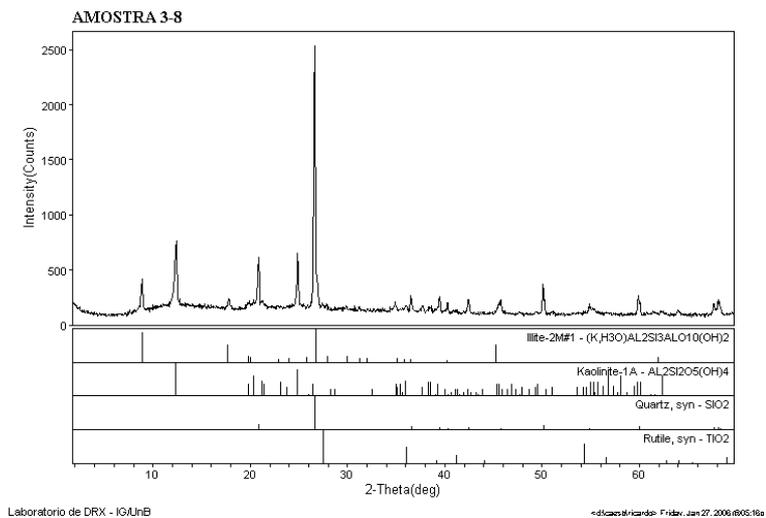






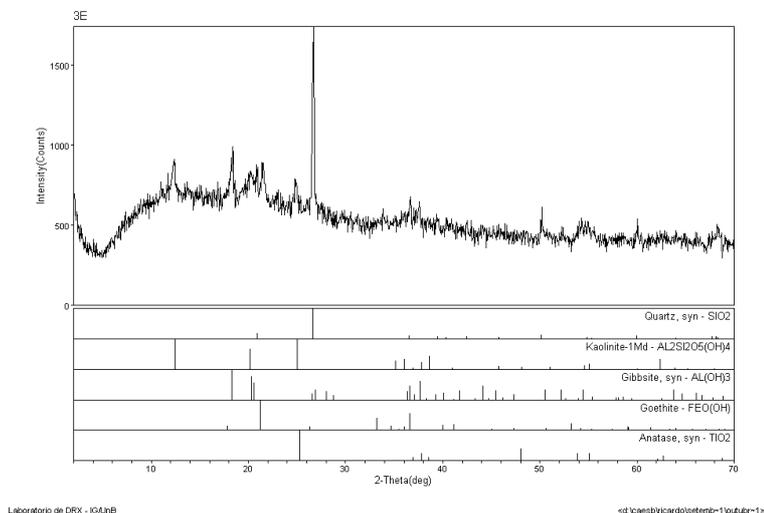
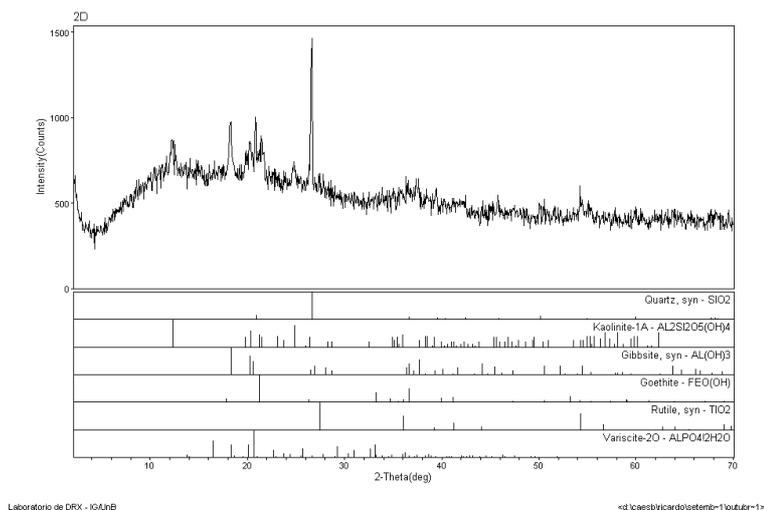
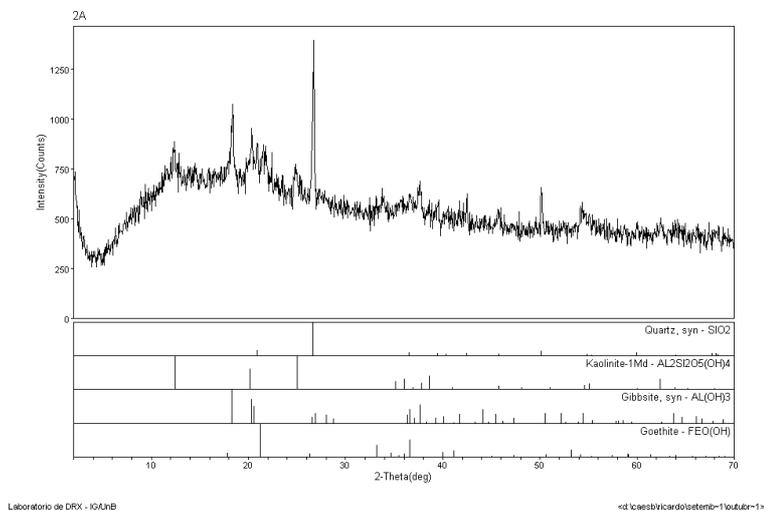


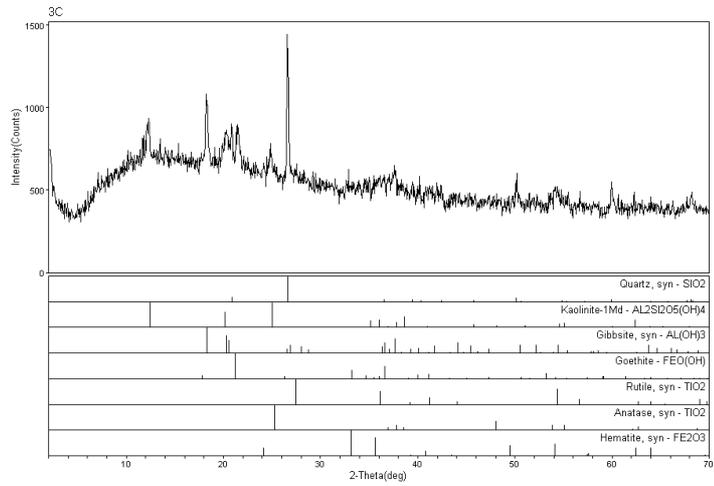






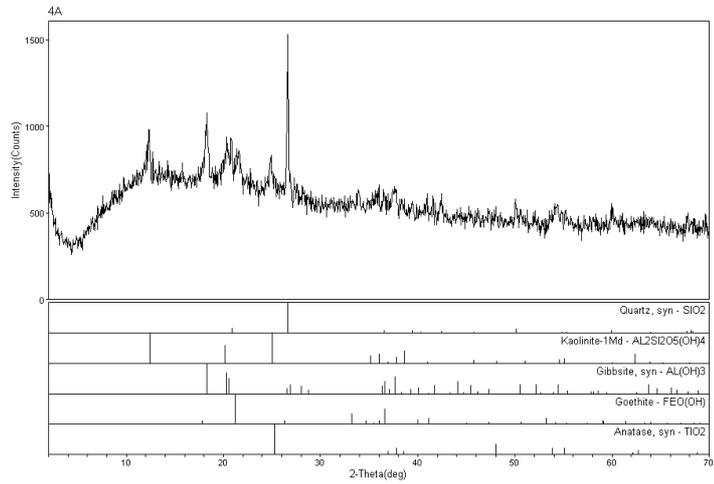
Difratogramas de raios-X das amostras de solo coletadas na malha 9 x 6. Data: Dezembro de 2006.





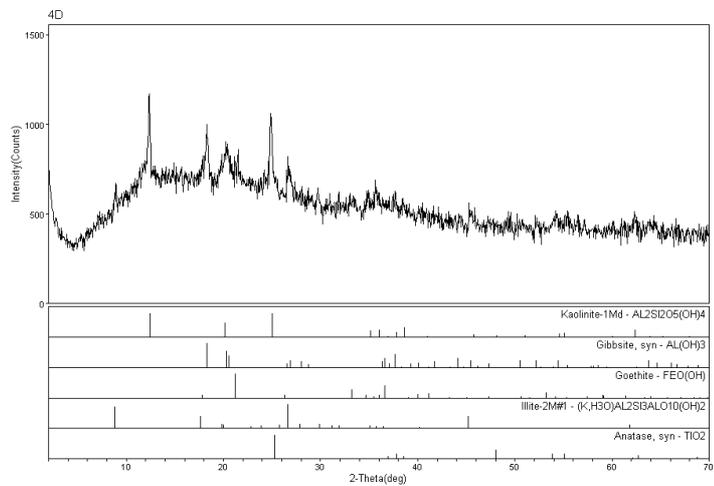
Laboratório de DRX - XG41B

c:\baesb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



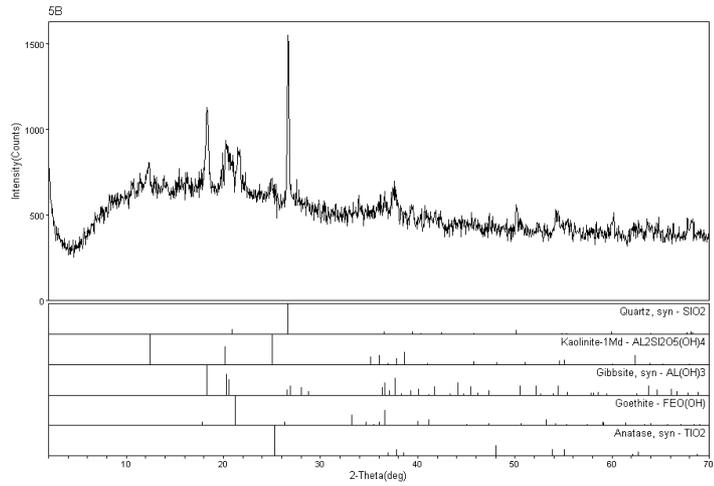
Laboratório de DRX - XG41B

c:\baesb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



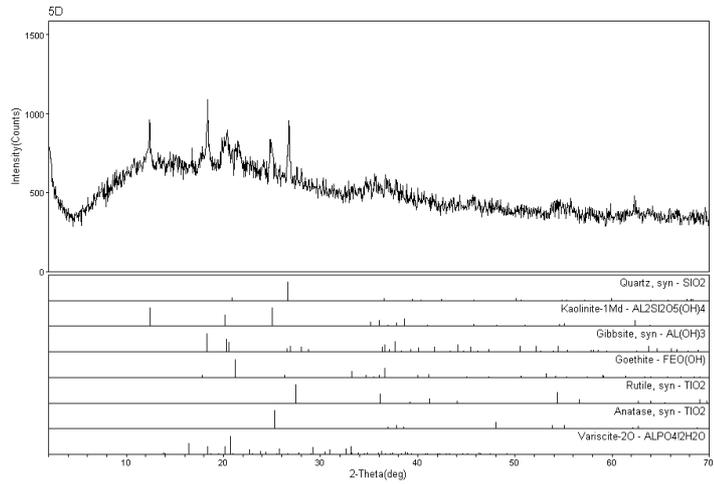
Laboratório de DRX - XG41B

c:\baesb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



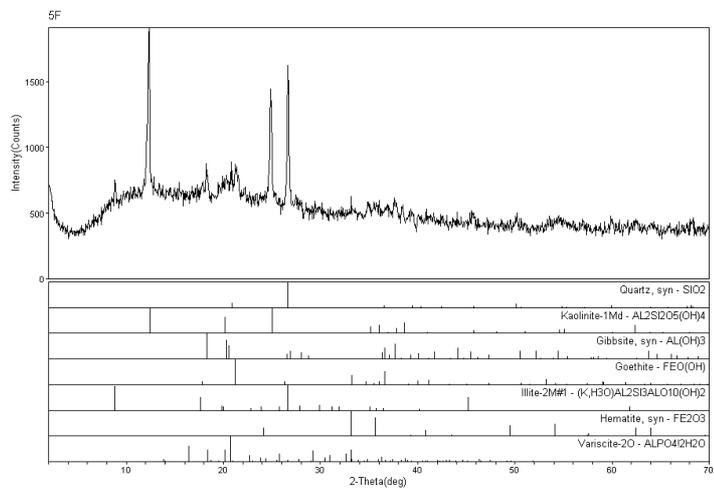
Laboratório de DRX - XRD BR

c:\samb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



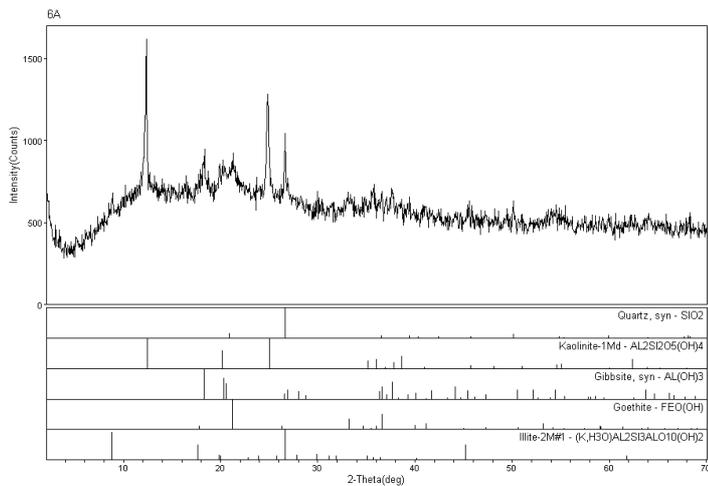
Laboratório de DRX - XRD BR

c:\samb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



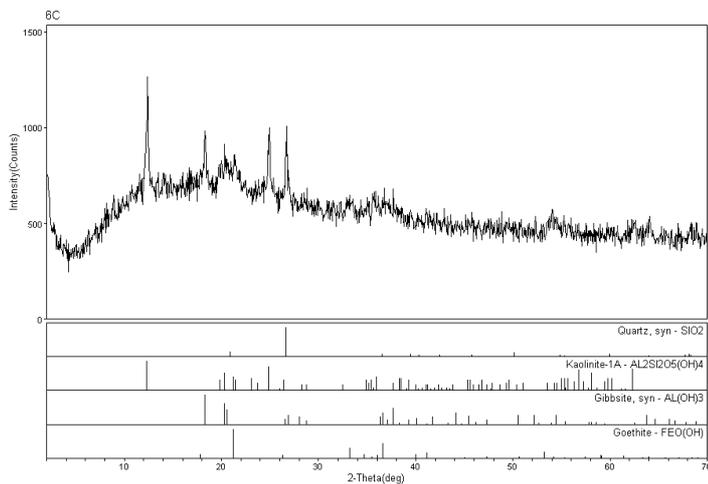
Laboratório de DRX - XRD BR

c:\samb\vicard\05temb-1\out\dr-1>



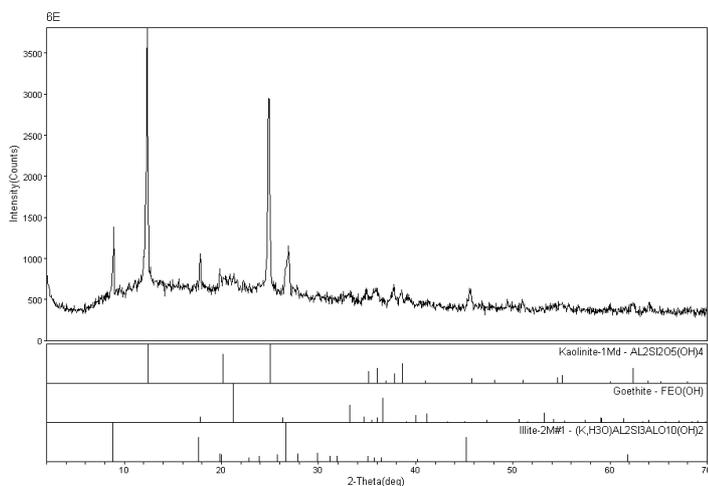
Laboratório de DRX - XG4BR

c:\vaesb\vicard\05temb-1\out\6A-1*



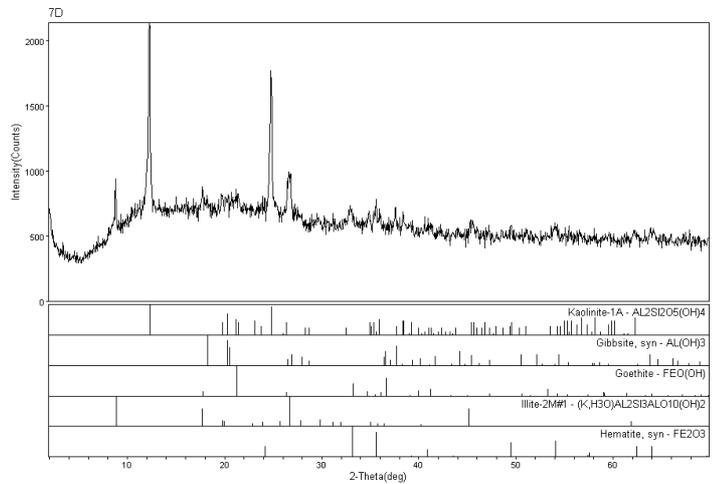
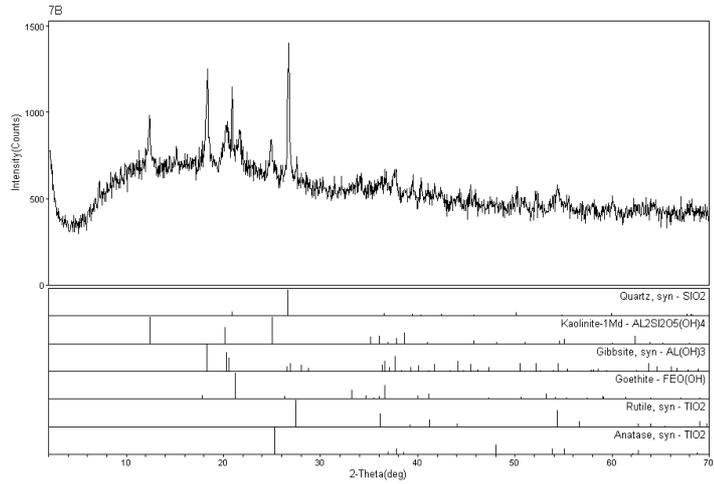
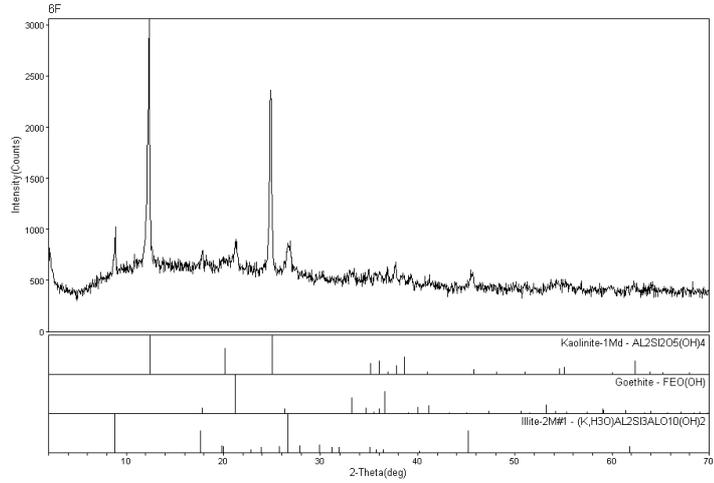
Laboratório de DRX - XG4BR

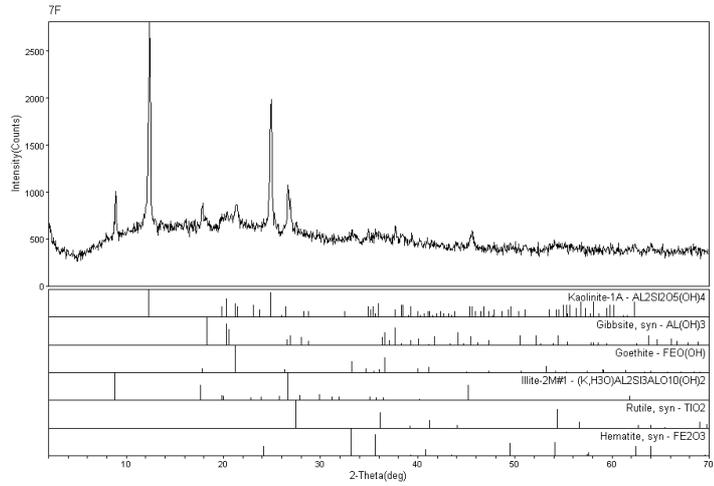
c:\vaesb\vicard\05temb-1\out\6C-1*



Laboratório de DRX - XG4BR

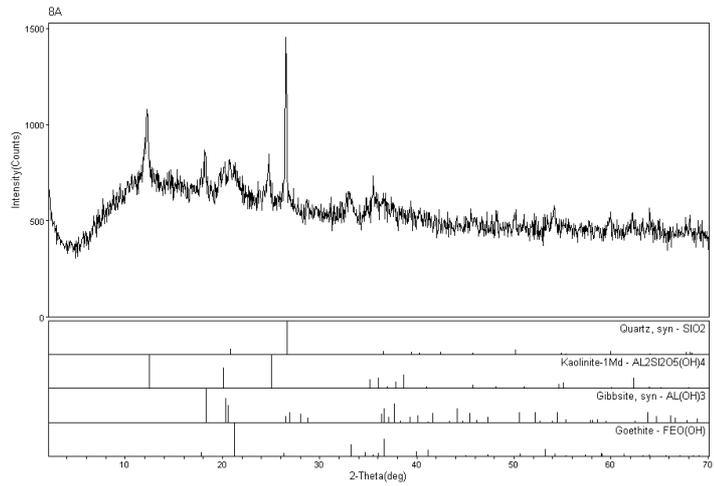
c:\vaesb\vicard\05temb-1\out\6E-1*





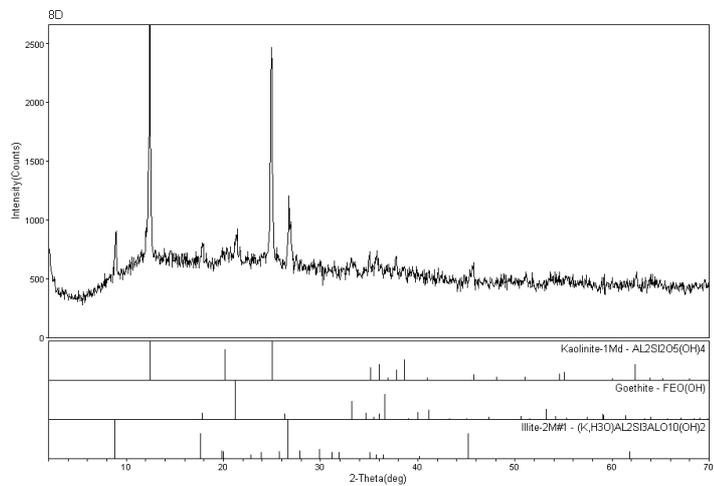
Laboratório de DRX - XG41B

<id>caes@bricardo@setem-1</id>



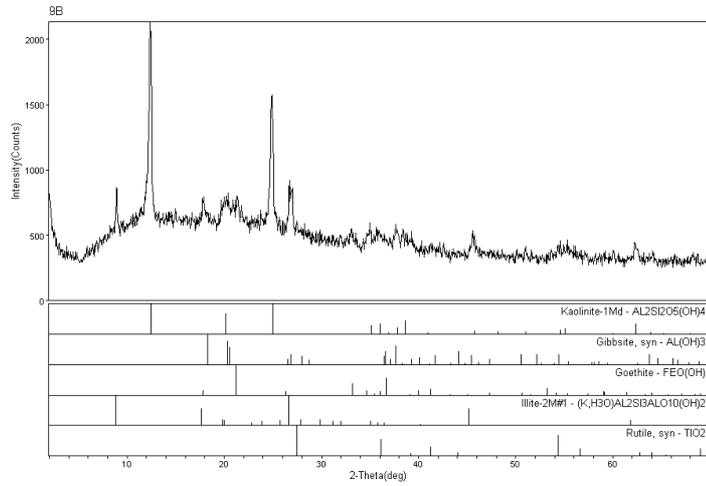
Laboratório de DRX - XG41B

<id>caes@bricardo@setem-1</id>



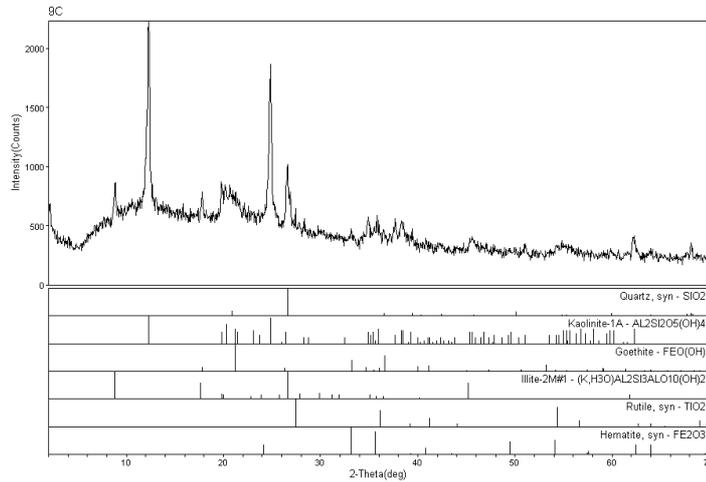
Laboratório de DRX - XG41B

<id>caes@bricardo@setem-1</id>



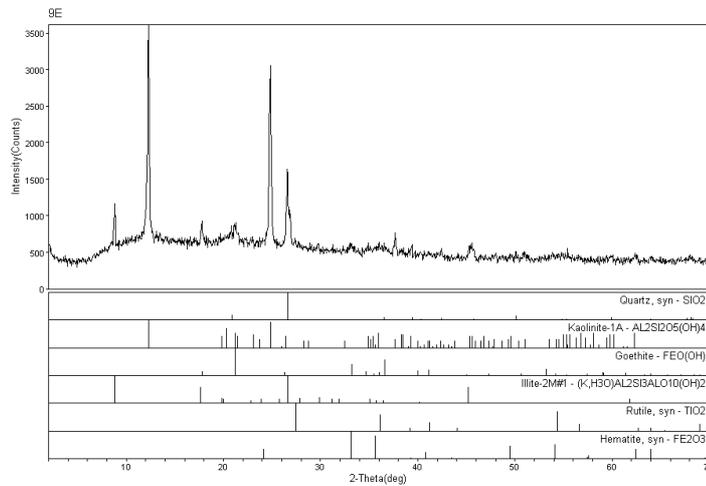
Laboratório de DRX - XG&HB

c:\t\caes\bricardo\setem0-1*



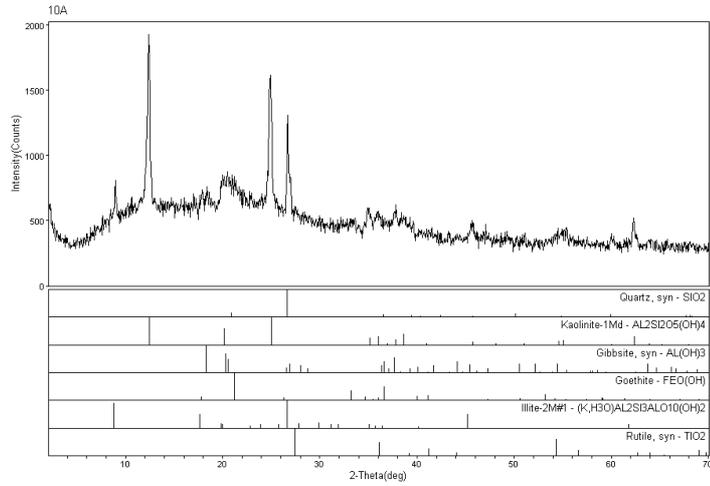
Laboratório de DRX - XG&HB

c:\t\caes\bricardo\setem0-1*



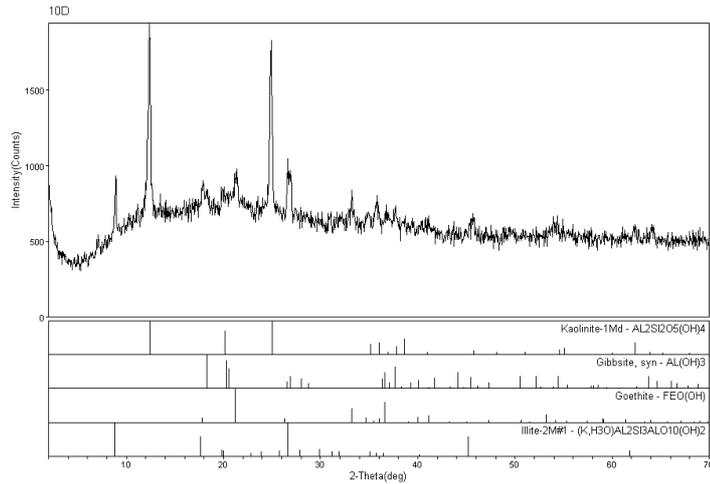
Laboratório de DRX - XG&HB

c:\t\caes\bricardo\setem0-1*



Laboratório de DRX - XG&NB

<id="caesbiviscardo/sem&nb=1">



Laboratório de DRX - XG&NB

<id="caesbiviscardo/sem&nb=1">



Resultados das análises realizadas em lodos de ETAS em diferentes estágios de intemperização.
Data: Abril de 2004.

<i>UTML</i> (m)	<i>UTMN</i> (m)	<i>Ponto</i>	<i>Areia</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Argila</i> (%)	<i>pH</i>	<i>Umidade</i> (%)	<i>ST</i> (%)	<i>SSF</i> (%)	<i>SSV</i> (%)	<i>C Org</i> (%)	<i>M Org</i> (%)
804925	8246843	lodo fresco	43,8	23,7	32,5	6,33	64,6	35,4	78	22	3,6	6,2
804931	8246848	lodo fresco	35,6	19,8	44,3	6,38	62,7	37,3	78	22	3,5	6
804934	8246854	lodo semi-seco	51	17,5	31,5	6,66	33,8	66,2	81	19	3,5	6
804975	8246862	lodo seco	64,1	19	16,9	6,35	23,5	76,5	72	28	5,1	8,8
804970	8246834	lodo antigo	38,6	26,8	34,6	6,27	66,9	33,1	77	23	3,7	6,4

<i>Ponto</i>	<i>Al</i> (%)	<i>Fe</i> (%)	<i>P</i> (mg/kg)	<i>Na</i> (g/kg)	<i>K</i> (g/kg)	<i>Zn</i> (mg/kg)	<i>Co</i> (mg/kg)	<i>Li</i> (mg/kg)	<i>Mn</i> (mg/kg)	<i>Cu</i> (mg/kg)	<i>Cd</i> (mg/kg)	<i>Ni</i> (mg/kg)
lodo fresco	11,3	4,7	565	0,8	2,57	43,6	1,6	26,3	94,9	25,3	2	19,2
lodo fresco	10,4	4,7	585	1,5	3,3	44,6	3,8	26,7	94,8	25,8	2	21,8
lodo semi-seco	13,6	5,4	665	0,8	3,95	43,7	4,9	20,5	92,2	23,7	2	20
lodo seco	11,6	6,7	1030	0,2	3,78	43,4	5,5	14,9	159,8	24,3	2	15,3
lodo antigo	12,6	5,3	605	0,6	5,52	46,7	3,3	25,9	124,2	26,3	2	19,8