

ALDO MAFFEI PRIETO FERNANDES

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO NAS ÁREAS DE
MINERAÇÃO DE “XISTO”(FOLHELHO PIROBETUMINOSO) EM
SÃO MATEUS DO SUL - PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ernani F. da Rosa Filho
Co-orientadores: Prof. Dr. André V. L. Bittencourt
Prof. Dr. Francisco J. F. Ferreira

**CURITIBA
1999**

TERMO DE APROVAÇÃO

ALDO MAFFEI PRIETTO FERNANDES

**Caracterização da Variação do Lençol Freático na Áreas de
Mineração de “Xisto” (Folhelho Pirobetuminoso) em São
Mateus do Sul – Paraná.**

**Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em
Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental, da
Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos
Professores:**



Presidente: Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho



Prof. Dr. José Geraldo de Melo



Prof. Dr. Riad Salamuni

Curitiba, julho de 1999

Ao pesquisador,
espírito incansável!

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho, Dr. André Virmond Lima Bittencourt e Dr. Francisco José Fonseca Ferreira, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, pela orientação e apoio durante o desenvolvimento do projeto.

À Petrobrás-SIX por ter propiciado o desenvolvimento da pesquisa e pelo apoio financeiro, através de convênio firmado com a UFPR.

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de Mestrado, sem a qual teria sido impossível a realização do projeto.

Ao Geólogo Henrique Krahenbuhl Porto Alegre, da Petrobrás-SIX, pela cordialidade e acompanhamento durante as visitas ao campo e pelo gentil fornecimento dos dados e materiais necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao Técnico Fabiano Barbosa dos Anjos, da Petrobrás-SIX, pela coleta de dados (monitoramento dos piezômetros) e pelo apoio nos trabalhos de campo.

Ao Geólogo Gernot Schicker por sua participação na pesquisa e colaboração através da coleta de água e análises e também pelo material fornecido (fotografias).

Ao Professor Dr. Paulo César Giannini e ao Engenheiro Civil Roberto Fendrich pela prestimosa ajuda através do fornecimento de importante material bibliográfico.

À Nicole Mariane Marinoni e ao Alexsandro Gregório, do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da UFPR, pelas análises físico-químicas de água e o sempre gentil atendimento.

Aos funcionários da Biblioteca do Setor de Tecnologia da UFPR, em especial à Eliane Maria Stroparo, pela orientação e revisão das referências bibliográficas.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, pelo companheirismo de todas as horas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FOTOGRAFIAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	3
3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
3.1 - LOCALIZAÇÃO	4
3.2 - GEOLOGIA	5
3.2.1 - Considerações sobre o ambiente de deposição	12
3.3 - GEOMORFOLOGIA E HIDROGRAFIA	17
3.4 - SOLOS E VEGETAÇÃO	18
3.5 - CLIMA	18
3.6 - MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DO XISTO	21
3.7 - RECUPERAÇÃO DOS TERRENOS MINERADOS	24
3.8 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O LENÇOL FREÁTICO NA ÁREA.....	29
3.8.1 - Freático em terrenos naturais	29
3.8.2 - Freático em terrenos reabilitados	32
4 - MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 - CONSTRUÇÃO DOS PIEZÔMETROS EM TERRENOS NATURAIS	35
4.2 - MONITORAMENTO DA REDE PIEZOMÉTRICA	39

4.3 - TRATAMENTO DOS DADOS DO MONITORAMENTO	39
4.4 - ENSAIOS DE BOMBEAMENTO E DE RECUPERAÇÃO DO NÍVEL	42
4.5 - COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA PARA ANÁLISE	45
4.6 - TRATAMENTO DOS DADOS DAS ANÁLISES DE ÁGUA	46
5 - RESULTADOS	47
5.1 - QUANTO À POTENCIOMETRIA DO FREÁTICO	47
5.1.1 - Alturas máximas, médias e mínimas das águas do freático.....	47
5.1.2 - Gráficos com os dados do monitoramento	47
5.1.3 - Mapas potenciométricos.....	50
5.1.4 - Potenciometria em área reabilitada.....	55
5.2 - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO FREÁTICO	56
5.2.1 - Transmissividade e condutividade hidráulica.....	56
5.2.2 - Gradiente hidráulico	57
5.3 - QUANTO AO ASPECTO QUÍMICO DO FREÁTICO	58
6 - CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE SÃO MATEUS DO SUL	4
2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE SÃO MATEUS DO SUL	5
3	DISTRIBUIÇÃO DOS AFLORAMENTOS E DAS COTAS (EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO MAR) DA FORMAÇÃO IRATI	6
4	ARCABOUÇO TECTÔNICO DO MAR IRATI NA BACIA DO PARANÁ E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS RÉPTEIS MESOSSAURÍDEOS NA AMÉRICA DO SUL	10
5	COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO IRATI EM SÃO MATEUS DO SUL, PR	11
6	REPRESENTAÇÃO DE UM AMBIENTE DE BACIA RESTRITA	15
7	REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DE TEMPERATURA MÉDIA E PLUVIOMETRIA PARA O PERÍODO DE JAN/1995 A JUN/1996, DE ACORDO COM AS TABELAS 1 E 2	20
8	PERFIL LITOLÓGICO DA JAZIDA DE SÃO MATEUS DO SUL	22
9	FLUXOGRAMA DO PROCESSO PETROSIX	23
10	FLUXOGRAMA DE OPERAÇÕES DO PROGRAMA DE REABILITAÇÃO DE ÁREAS MINERADAS	25
11	PROCESSO DE LAVRA E RECUPERAÇÃO DOS TERRENOS MINERADOS ...	26
12	POÇOS-CACIMBA ESTUDADOS POR RIESEMBERG (1994)	31
13	POTENCIOMETRIA PARA A ÁREA MOSTRADA NA FIGURA 12	32

14	LOCALIZAÇÃO DOS PIEZÔMETROS UTILIZADOS PARA MONITORAR O NÍVEL DA ÁGUA NO SETOR SUL E SETOR NORTE	36
15	SEÇÃO ATRAVÉS DA LINHA DE PIEZÔMETROS DO SETOR SUL	37
16	SEÇÃO ATRAVÉS DA LINHA DE PIEZÔMETROS DO SETOR NORTE	37
17	PERFIL CONSTRUTIVO DOS PIEZÔMETROS DO SETOR SUL E DO SETOR NORTE	38
18	EXEMPLO DE PLANILHA COM OS DADOS DO TESTE DE BOMBEAMENTO E RECUPERAÇÃO	43
19	DIAGRAMAS REPRESENTATIVOS DAS CONDIÇÕES DO TESTE	44
20	LOCALIZAÇÃO DOS PIEZÔMETROS E POÇOS-CACIMBA DAS ANÁLISES DE ÁGUA	46
21	RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E O NÍVEL DA ÁGUA NO INTERIOR DO PZ. 1 SUL (PERÍODO DE JAN/1995 A JUN/1996)	49
22	RELAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA COM A DISTÂNCIA À FRENTE DE LAVRA NO SETOR SUL	49
23	INFLUÊNCIA DE UMA DETONAÇÃO NO REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA (PZ. 13 SUL)	50
24	POTENCIOMETRIA MÁXIMA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 11.01.1995, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE APROX. 70 M DO PZ. 14	52
25	POTENCIOMETRIA MÉDIA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 23.02.1995, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE APROX. 40 M DO PZ. 14	52
26	POTENCIOMETRIA MÍNIMA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 31.05.1995, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 52 M EM RELAÇÃO AO PZ. 7	53

27	POTENCIOMETRIA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 02.10.1995, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 65 M EM RELAÇÃO AO PZ. 5. OBSERVA-SE A INVERSÃO DO FLUXO NO SENTIDO DA MINA	53
28	POTENCIOMETRIA MÁXIMA NO SETOR NORTE, MEDIDA EM 27.03.1996, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 115 M DO PZ. 1E	54
29	POTENCIOMETRIA MÍNIMA NO SETOR NORTE, MEDIDA EM 29.04.1996, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 115 M DO PZ. 1E	54
30	NÍVEL DA ÁGUA EM TERRENOS NÃO MINERADOS (PZ. 1 A 14) E APÓS A MINERAÇÃO E REABILITAÇÃO DA MESMA ÁREA, QUANDO O LENÇOL FREÁTICO PASSA A POSICIONAR-SE PRÓXIMO AO PISO DA MINA (PZ. 14R)	56
31	DIAGRAMA TRIANGULAR CONTENDO OS POLÍGONOS DE RELAÇÕES INTERCATIÔNICAS (PRIC) DE ÁGUAS DO SISTEMA SIX	60
32	RELAÇÃO ENTRE Ca^{2+} E Mg^{2+} EM ÁGUAS DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL	61
33	RELAÇÃO ENTRE Na^+ E K^+ EM ÁGUAS DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL	62
34	RELAÇÕES ENTRE Na^+ E OS CÁTIOS K^+ , Ca^{2+} E Mg^{2+} EM ÁGUAS DOS TERRENOS NATURAIS E DE CHUVA DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL	62

LISTA DE TABELAS

1	DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM MM	19
2	DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS EM ° C	20
3	POTENCIAL DAS RESERVAS DE XISTO DE SÃO MATEUS DO SUL	21
4	PRODUÇÃO ATUAL DA PETROSIX	24
5	DADOS DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA EM ALGUNS PIEZÔMETROS, ACRESCIDOS DE INFORMAÇÕES RELATIVAS À TEMPERATURA DO AR E À PRECIPITAÇÃO	40
6	VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS DOS NÍVEIS DE ÁGUA NOS PIEZÔMETROS DO SETOR SUL	48
7	VALORES DE TRANSMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDOS NO SETOR NORTE DA ÁREA DE ESTUDO	56
8	VALORES DO GRADIENTE HIDRÁULICO OBTIDOS PARA O SETOR SUL E SETOR NORTE DA ÁREA DE ESTUDO	57
9	PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS DE ÁGUAS DA ÁREA DE MINERAÇÃO DO FOLHELHO PIROBETUMINOSO EM SÃO MATEUS DO SUL - PR	59
10	VALORES LIMITES PARA OS POLÍGONOS DE RELAÇÕES INTERCATIÔNICAS CONSTANTES DA FIGURA 31	60

LISTA DE FOTOGRAFIAS

1	VISTA DO MÓDULO INDUSTRIAL DA SUPERINTENDÊNCIA DA INDUSTRIALIZAÇÃO DO XISTO - PETROBRÁS (SÃO MATEUS DO SUL)	69
2	VISTA GERAL DA FRENTE DE LAVRA, NOTANDO-SE AO FUNDO A ESCAVADEIRA TIPO <i>DRAGLINE</i> UTILIZADA PARA A REMOÇÃO DO CAPEAMENTO E DA CAMADA INTERMEDIÁRIA	69
3	REMOÇÃO E TRANSPORTE DO FOLHELHO PIROBETUMINOSO	70
4	PREENCHIMENTO DA CAVA DA MINA DURANTE A REABILITAÇÃO DA ÁREA. DISPOSIÇÃO DO “XISTO” RETORTADO (COR PRETA) SOBRE O ESTÉRIL (COR CINZA), JUNTO COM O LIXO DA CIDADE (COR BRANCA)	70
5	CORTE DE ESTRADA EM ÁREA REABILITADA, MOSTRANDO A DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO E DE ARGILA SOBRE O “XISTO” RETORTADO	71
6	ÁREA EM REABILITAÇÃO, JÁ COM A COBERTURA VEGETAL	71
7	VISTA DA CAVA DA MINA COM A ÁGUA CAPTURADA DO LENÇOL FREÁTICO, NOTANDO-SE A CONTAMINAÇÃO DESTA PELO ELEMENTO FERRO	72
8	IMAGEM DO LAGO B, CUJAS ÁGUAS SÃO PROVENIENTES DO LENÇOL FREÁTICO DA ÁREA REABILITADA E BENEFICIAM-SE COM A AÇÃO DEPURADORA DOS AGENTES NATURAIS.	72

RESUMO

O estudo objetivou, principalmente, definir a abrangência do impacto exercido pela mineração do folhelho pirobetuminoso ou “xisto” no rebaixamento do lençol freático em terrenos naturais, na área da PETROBRÁS-SIX, em São Mateus do Sul, Estado do Paraná. Foram também analisadas as alterações que ocorrem no quimismo da água e a nova posição do nível do freático nos terrenos reabilitados, após a mineração. A lavra é efetuada a céu aberto, ocorrendo portanto uma drástica alteração na paisagem local, onde a cava atinge cerca de 30 metros de profundidade. A jazida do minério apresenta duas camadas distintas de folhelho, separadas por uma camada intermediária considerada estéril. Denominadas de camada superior e camada inferior, as duas apresentam, respectivamente, espessuras médias de 6 e 3 metros e teores de óleo de 6 a 8% e 10 a 12%. Para possibilitar o estudo do freático nos terrenos naturais, ainda não minerados, diversos piezômetros foram implantados. O monitoramento do nível de água nos piezômetros foi realizado diariamente pela PETROBRÁS-SIX, no período de 1995 a 1996, simultaneamente ao avanço e aproximação da mina. Os dados assim obtidos foram fornecidos mensalmente, acompanhados das informações de pluviometria e temperatura. Com estes dados foram elaborados mapas de potenciometria máxima, média e mínima para a área de estudo, assim como gráficos relacionando o nível de água nos piezômetros com a precipitação, com a distância à frente de lavra e com as detonações. A análise dos resultados mostra que a principal causa das oscilações do lençol freático são as variações sazonais. A mina também exerce influência no abaixamento do nível de água, porém isto somente ocorre quando a frente de lavra aproxima-se dos piezômetros a uma distância inferior a 70 metros. Aos 65 metros de distância observa-se uma inversão de fluxo na direção da mina. Por ocasião de uma detonação, foi constatada a secagem dos piezômetros mais próximos. Ao ser estudado o freático nas áreas reabilitadas, foram utilizados dados obtidos de piezômetros instalados na antiga Mina UPI e em terrenos mais recentes. Nestes locais o abaixamento do nível de água é irreversível, e o lençol assume uma nova posição próxima ao piso da antiga mina. Para a verificação das características físico-químicas das águas do sistema SIX, amostras foram coletadas e analisadas nos laboratórios da PETROBRÁS-SIX e UFPR. Dado o conteúdo piritoso do folhelho, as águas que ocorrem na área já apresentam naturalmente um certo grau de acidez. Porém, nas áreas reabilitadas esta característica é ampliada, somando-se ao excessivo teor de sais dissolvidos, porque o fracionamento do material retornado que preenche a cava da mina favorece os processos de dissolução e lixiviação. Assim, dois grupos distintos podem ser caracterizados: um representado pelas águas que percolam as áreas reabilitadas e o outro representado pelas águas das áreas ainda não atingidas pela mineração. O primeiro grupo, com alta salinidade, apresenta natureza cálcica. O segundo grupo, com baixa salinidade, apresenta características sódio-magnesianas.

ABSTRACT

The study aimed, primarily, to define the extent of the impact of oil shale mining on the lowering of the water table in natural lands in the PETROBRÁS-SIX area in São Mateus do Sul, Paraná State. The alterations that occur in the water chemism and the new position of the water table in the reclaimed areas post-mining were also evaluated. The activity is carried out as open-pit mining; therefore, drastic alteration occurs in the local landscape, where the pit reaches an approximate depth of 30 metres. The ore deposit presents two distinct layers of shale separated by an intermediate layer considered barren. Denominated upper layer and lower layer, they have, respectively, average thickness of 6 metres and 3 metres, and oil contents of 6 to 8% and 10 to 12%. In order to make possible the study of the groundwater in the natural lands, not mined so far, a number of monitoring wells were implanted. The monitoring of the water level in the monitoring wells was performed daily by PETROBRÁS-SIX, in the period from 1995 to 1996, simultaneously with the advance and approach of the mine. The data thus obtained were provided monthly, along with data on pluviometry and temperature. With these data, maximum, medium and minimum potentiometric maps were produced for the study area, as well as charts relating the water level in the monitoring wells to precipitation, distance from the mining front, and to the blasts. The analysis of the results shows that the main cause of the fluctuations of the water table are the seasonal variations. The mining also has an influence on the lowering of the water level, but this only takes place as the mining front approaches the monitoring wells at a distance inferior to 70 metres. At 65 metres an inversion of the flow towards the mine is observed. On the occasion of a blast, the drying-up of the nearest monitoring wells was verified. Upon studying the groundwater in the reclaimed areas, data obtained from monitoring wells installed in the old UPI mine and in more recent areas were utilised. At these sites the lowering of the water level is irreversible, and the water table takes a new position near the floor of the old mine. For the evaluation of the physico-chemical characteristics of the SIX system waters, samples were collected and analysed at the PETROBRÁS-SIX and UFPR laboratories. Given the pyritic content of the shale, the waters naturally occurring in the area already show a certain degree of acidity. However, in the reclaimed areas this characteristic is increased, adding to the excessive content of dissolved salts, because the fractionating of the retorted material that fills the mine pit promotes the processes of dissolution and leaching. Therefore, two distinct groups can be characterised: one is represented by waters that percolate the reclaimed areas, and the other, represented by waters from areas not yet affected by the mining. The first group, with high salinity, has calcitic nature. The second group, with low salinity, shows sodium-magnesian characteristics.

1 - INTRODUÇÃO

A humanidade depende dos recursos minerais. No domínio da mineração, a arte está em fornecer estes recursos e contribuir para a qualidade de vida causando o menor impacto ambiental possível (POPP, 1992).

A atividade de mineração a céu aberto causa muita agressão ao meio ambiente, normalmente afetando suas características físicas, químicas e biológicas.

Entre os impactos ambientais causados pela mineração e processamento do folhelho pirobetuminoso em São Mateus do Sul, destaca-se o exercido sobre o lençol freático. Os resultados deste impacto expressam-se através do rebaixamento do nível do lençol, devido ao gradiente que é criado em função da profundidade da cava da mina e por modificações na composição química da água. Como consequência, foi cogitado acerca da possibilidade da mineração ser a responsável pela secagem e diminuição do volume de água de vários poços-cacimba existentes em propriedades vizinhas da área, cujos proprietários entraram com reclamações contra a PETROBRÁS-SIX. Desde então, para minimizar o problema, a empresa tem abastecido esta população através de caminhões-pipa.

Numa tentativa para encontrar uma resposta a esta questão, contatos foram realizados em 1993 com o Departamento de Geologia da UFPR, com vistas à obtenção de um diagnóstico da situação. Em decorrência, com a finalidade de quantificar o impacto, um projeto foi iniciado no final do ano de 1994, através de convênio firmado entre as duas instituições. Este projeto, executado até o início do ano de 1997, possibilitou o desenvolvimento da presente dissertação de mestrado.

Sobre a população afetada ou com risco potencial de ser afetada, ROSA FILHO & BONACIM (1993) referem que o número de habitantes nas imediações da PETROBRÁS-SIX

é de cerca de 1500 a 2000 pessoas. Considerando-se para cada residência, contendo em média cinco pessoas, um consumo de 1 m³/dia, tem-se uma demanda hídrica máxima total de aproximadamente 16 m³/dia.

Para que a PETROBRÁS-SIX dispusesse de elementos bem fundamentados para fazer frente às ações reclamatórias por parte dos proprietários atingidos, fazia-se necessário saber se as variações na posição do lençol freático são causadas pelo avanço da mina e sua ação impactante ou se acontecem principalmente em função da alternância de períodos de maior e menor precipitação.

O estudo foi efetuado em terrenos naturais, ainda não minerados, adjacentes à lavra do folhelho pirobetuminoso. Para que se encontrassem respostas aos objetivos propostos para o estudo, a metodologia aplicada envolveu o monitoramento do nível do lençol e o estudo das suas características potenciométricas durante os períodos úmidos e secos, sob a influência do avanço da mineração e da ocorrência de detonações na frente de lavra. Em adição, foi observado o comportamento do freático nas áreas recuperadas e analisados os aspectos do quimismo das águas que percolam os terrenos naturais e reabilitados.

Na primeira parte do trabalho faz-se a caracterização da área de estudo, enfocando sua localização, aspectos geológicos e geomorfológicos, hidrografia, solos, vegetação e clima. No ítem referente à geologia da área, procede-se a uma revisão bibliográfica dos estudos de vários autores sobre a Formação Irati, envolvendo considerações sobre o seu ambiente deposicional. Na seqüência, ainda na forma de revisão bibliográfica, são abordados aspectos da mineração do folhelho pirobetuminoso e da recuperação dos terrenos já minerados, bem como feitas considerações acerca do freático em terrenos naturais e reabilitados. Na continuidade tem-se a descrição dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa e os resultados obtidos. Por último, citam-se as conclusões a que se chegou após a realização da pesquisa.

2 - OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo foi definir a abrangência da influência exercida pela mineração no rebaixamento do lençol freático na área, em terrenos naturais. Sabendo-se que esta influência existe, fazia-se necessário delimitá-la, caracterizando-se a distância a partir da qual os efeitos começam a ser sentidos. Dispondo-se dos dados de potenciometria e pluviometria para a área de estudo, buscou-se definir em que medida atuam as variações sazonais e a atividade de mineração sobre as oscilações do lençol freático. Os estudos permitiram definir, para esta situação, qual dos dois fatores apresenta a maior significância.

Procurou-se também caracterizar o quimismo das águas dos terrenos naturais e dos terrenos reabilitados. Este tema foi extensamente abordado por PORTO ALEGRE (1995) em seus estudos sobre as áreas reabilitadas na mineração do xisto. Neles, o autor refere as alterações que ocorrem na composição das águas que percolam através do material disposto nas cavas da mineração, confrontando-as com as outras águas do sistema. Este trabalho não pretende alterar e nem mesmo contestar nenhum resultado, apenas acrescentar alguns dados, uma vez que aquele estudo mostra-se completo em relação ao assunto tratado.

Como complemento, foram realizadas observações acerca da nova posição do nível da água nos terrenos reabilitados. Nestes, a potenciometria é drasticamente alterada em função das mudanças físicas ocorridas no ambiente.

3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 - LOCALIZAÇÃO

Os estudos foram conduzidos na área da Petrobrás-SIX (foto 1), na cidade de São Mateus do Sul, Estado do Paraná, distante cerca de 140km de Curitiba e definida geograficamente pelas coordenadas $25^{\circ} 52' 23''$ de latitude sul e $50^{\circ} 23' 05''$ de longitude oeste, Gr. (figura 1). Para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa foram determinadas duas faixas de terreno de aproximadamente 20.000m^2 (setor sul) e 13.000m^2 (setor norte), adjacentes à Mina Paiol Grande, atual área em que se processa a lavra do folhelho pirobetuminoso. A referida mina situa-se na porção noroeste da cidade, à esquerda da rodovia PR-364 que faz a ligação entre São Mateus do Sul e Irati (figura 2).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE SÃO MATEUS DO SUL

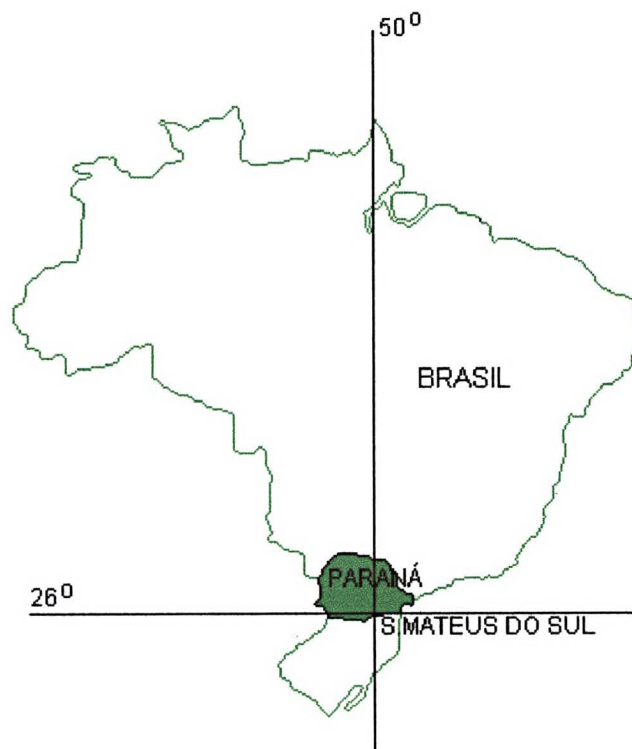
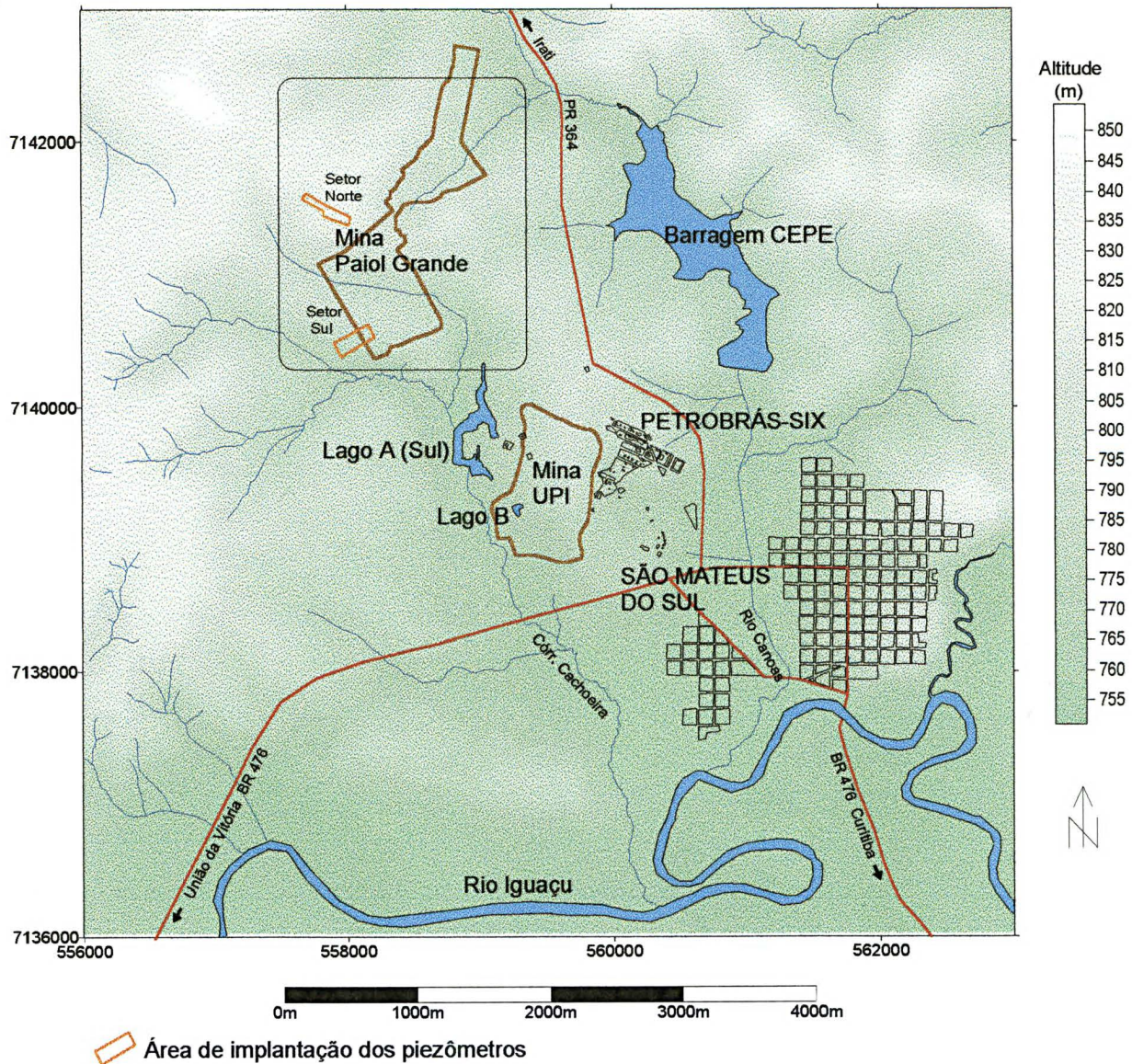


FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE SÃO MATEUS DO SUL



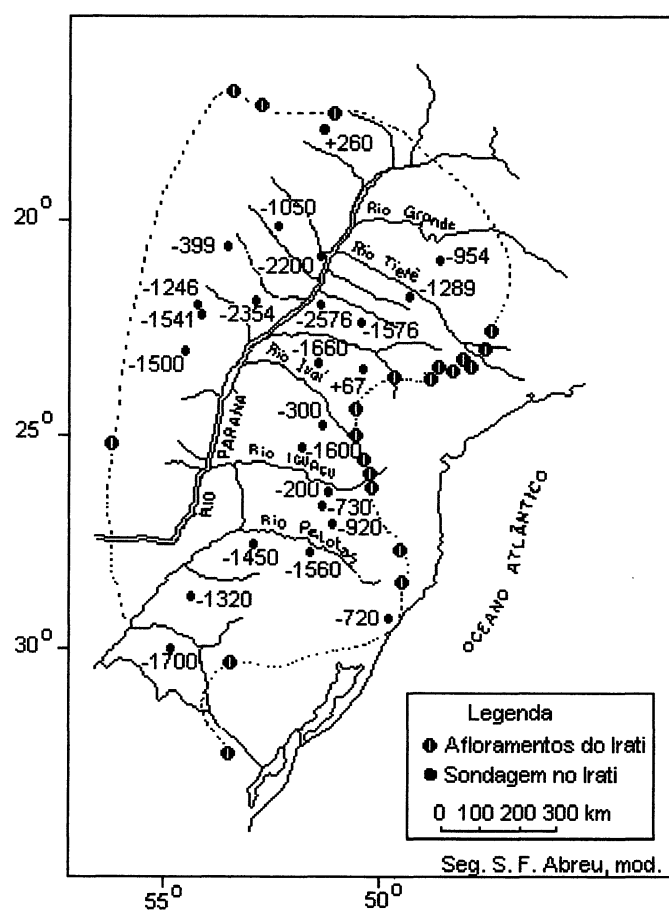
3.2 - GEOLOGIA

O local de estudo assenta sobre rochas sedimentares da Formação Irati, unidade basal do Grupo Passa Dois, da Bacia do Paraná. Esta formação, originada no Permiano Superior, ocorre numa extensão de mais de 2.000km, englobando parte dos Estados de Goiás, Mato

Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, alcançando também o Uruguai, Paraguai e Argentina (figura 3).

Estratigraficamente, situa-se acima da Formação Palermo, do Grupo Guatá, Super Grupo Tubarão e abaixo da Formação Serra Alta, sendo os dois contatos de forma concordante. Tem geralmente espessuras da ordem de 30 a 40 metros. A maior espessura encontrada foi de 85 metros no poço 2-CM-1-PR da PETROBRÁS (NORTHFLEET *et al.*, 1969).

FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS AFLORAMENTOS E DAS COTAS (EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO MAR) DA FORMAÇÃO IRATI



Fonte: Modificado de AMARAL (1971).

A Formação Irati foi inicialmente descrita e denominada por WHITE (1908), em seu célebre trabalho sobre a coluna estratigráfica das rochas gonduânicas do Sistema de Santa Catarina, inserido no Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. A seção tipo estudada por White situa-se a três quilômetros ao sul da cidade de Irati, no Estado do Paraná, daí advindo sua denominação. O referido autor, ao descrever o material por ele estudado, considerou: “parece ser geralmente petrolífero, de forma que tem sempre o cheiro de petróleo quando quebrado de fresco e em superfície que não tenha sido alterada pelo tempo”.

Para GORDON JR. (1947), “os folhelhos pretos sapropélicos de Irati, Paraná, que exalam um cheiro de querosene em fratura recente, e sua fauna de Mesosaurus, constituem um marco seguro e facilmente reconhecível da base da série Passa Dois”.

A formação foi dividida por BARBOSA & ALMEIDA (1948) e BARBOSA & GOMES (1958) *in* SCHNEIDER *et al.* (1974), nos Membros Taquaral e Assistência, por ordem de deposição. O Membro Taquaral consiste de siltitos e folhelhos cinza-escuros. O Membro Assistência, o qual caracteriza a seção oleígena, apresenta folhelhos cinza-escuros e folhelhos pretos pirobetuminosos, contendo intercalações de calcários e dolomitos. Segundo FONSECA *et al.* (1989c), predominam os dolomitos, numa relação $MgO/CaO = 0,57$. Verificam-se ainda ocorrências localizadas de camadas argilosas e de nódulos e veios de sílex.

Com respeito aos folhelhos pirobetuminosos ou “xistos”, como também são conhecidos, MOREIRA (1978a) informa que “apresentam-se como rochas de aspecto laminado, granulação fina, compactas ‘*in natura*’, se esfoliando quando intemperizadas, apresentando uma coloração que varia entre o cinza-escuro, castanho e negro. A composição mineral é de base argilosa na qual encontra-se intimamente disseminada a matéria orgânica conhecida como ‘querogênio’ ”.

O termo “querogênio” foi utilizado pela primeira vez pelo Professor Crum Brown quando este, estudando os xistos da Escócia, assim descreveu o material contido neles e que por destilação fornecia óleo (MCKEE & GOODWIN, 1925).

SANTOS & LEITÃO (1979), ao discorrerem sobre o xisto comentam que o termo betuminoso aplica-se quando a matéria orgânica pode ser facilmente retirada através de solvente e pirobetuminoso quando tal não ocorre, sendo então necessário o aquecimento.

De acordo com MENDES (1984), “um folhelho com teor de matéria orgânica acima de 10% é referido como folhelho oleígeno. No decorrer da diagênese (litificação) essa matéria orgânica poderá converter-se em querogênio”.

Quando alterados, os xistos adquirem uma tonalidade azulada em função da eliminação do querogênio, fato observável em cortes de estradas e ferrovias (WHITE, 1908).

Segundo NORTHFLEET *et al.*(1969), “níveis betuminosos, bem desenvolvidos no leste da Bacia do Paraná, tendem a ser substituídos por calcários e sílex a partir do Arco de Ponta Grossa para o norte e noroeste. Nos folhelhos carbonosos e betuminosos são abundantes os restos do réptil *Mesosaurus brasiliensis* McGregor. A idade permiana da formação foi estabelecida por McGregor ao descrever este fóssil e compará-lo com formas afins do Permiano da África do Sul”. A título de esclarecimento, o *Mesosaurus brasiliensis* McGregor (1908), réptil de 40 a 60 centímetros de comprimento, é assemelhado ao *Mesosaurus tumidus* Gervais (1867), da África do Sul.

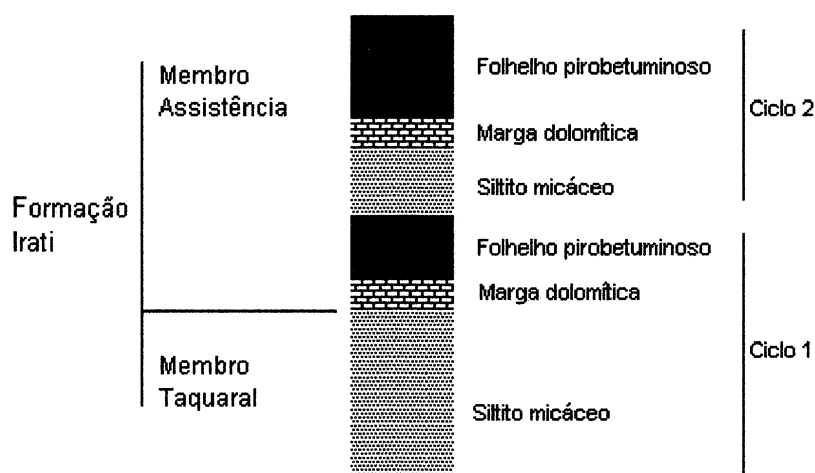
PADULA (1968) correlaciona a Formação Irati com as camadas “White-Band” do Grupo Upper Shales, Série Dwycka, Sistema Karoo, África do Sul, em razão desta apresentar as mesmas associações de peixes, crustáceos, *Mesosaurus* e *Stereosternum*. *Stereosternum tumidum* é um réptil descrito por Cope em 1885, semelhante ao *Mesosaurus* e que ocorre no Estado de São Paulo, ao contrário deste último, cuja presença estende-se do Paraná para o sul.

SHIKAMA & OZAKI (1966) *in* OELOFSEN & ARAÚJO (1983), descreveram uma terceira forma no Estado de São Paulo, à qual denominaram *Brazilosaurus sanpauloensis*. Segundo VIEIRA *et al.* (1991), a porção da Bacia do Paraná situada ao norte do Alinhamento de Guapiara, contendo águas mais rasas e material carbonático, favoreceu a presença de *Stereosternum* e *Brazilosaurus*, enquanto que a região situada ao sul, contendo águas mais profundas, frias e com predominância de folhelhos pretos, propiciou a proliferação de *Mesosaurus*. OELOFSEN & ARAÚJO (1983), referem que a fácies carbonática da porção norte da Bacia do Paraná é considerada como tendo origem numa sub-bacia separada da porção sul devido à influência do Arco de Ponta Grossa. Estes autores, após estudos, confirmaram a presença de *Stereosternum* e *Brazilosaurus* em Passo de São Borja, no Rio Grande do Sul, onde ocorre fácies carbonática semelhante à do Estado de São Paulo. A figura 4 mostra o arcabouço tectônico do Mar Irati na Bacia do Paraná e a distribuição geográfica dos répteis mesossaurídeos na América do Sul (FERREIRA, 1984).

Em São Mateus do Sul, a Formação Irati apresenta duas camadas distintas de xisto, separadas por uma camada intermediária, com espessura média de 9,0 metros, contendo siltito e intercalações de margas dolomíticas com xisto. Denominadas de camada superior e camada inferior, as duas camadas oleígenas apresentam, respectivamente, espessuras médias de 6,0 e 3,0 metros (figura 5). O capeamento, com espessura média entre 5 e 20 metros, constitui-se de solo vegetal sobreposto a camada argilosa, incluindo na base os siltitos da Formação Serra Alta, semelhantes aos da camada intermediária.

De acordo com d'OLIVEIRA & BARTHOLO (1964), “na região a NW de São Mateus do Sul, a Formação Irati apresenta um mergulho médio de 15,5 m/km (15' de arco) para SW de camadas com direção aproximada N28°15'W. A espessura média da formação é de 44 metros”.

FIGURA 5 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO IRATI EM SÃO MATEUS DO SUL, PR



Fonte: Modificado de PORTO ALEGRE (1995).

Ainda segundo d'OLIVEIRA & BARTHOLO (1964), “realça-se, no entanto, a grande regularidade no comportamento dessas camadas em espessura, direção, mergulho e teores de óleo, embora haja a registrar a ocorrência de algumas falhas importantes e de ocasionais, mas por vêzes importantes, intrusões de diabásio do Triássico-Jurássico, geralmente associadas às falhas. Na vizinhança dessas intrusões os teores de querogênio praticamente são nulos, numa extensão que varia com a espessura da intrusão. Ao menos na região estudada em pormenor, essas falhas ocorrem sempre segundo as direções NE, NNE ou NW”.

Nos locais onde ocorrem os diversos falhamentos os xistos apresentam-se bastante cataclados, com alterações em suas características físicas, o que afeta o processamento industrial por causa da não homogeneidade do material. Alguns métodos elétricos aplicados, tais como caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo associado com sondagens elétricas verticais e medições de resistividade em testemunhos de sondagem em laboratório, mostraram que as zonas meteorizadas ocorrem em função da presença destas estruturas geológicas

(falhamentos) e da profundidade das camadas de folhelho pirobetuminoso em relação à superfície. A falha mais notável, com direção aproximada de N30E, situa-se no limite entre as minas UPI e Cachoeira e apresenta rejeito vertical de cerca de 8 metros. Este falhamento afetou o xisto numa largura de cerca de 15 metros, o qual, devido ao grau de meteorização, não pode ser aproveitado pela PETROSIX (PAULA & PORTO ALEGRE, 1987).

3.2.1 - Considerações sobre o ambiente de deposição

Segundo GAMA JUNIOR (1989), a sedimentação permocarbonífera da Bacia do Paraná efetuou-se em consequência da transgressão marinha global ocorrida após a glaciação gondwânica. Esta transgressão atingiu seu máximo durante a deposição dos carbonatos do topo da Formação Irati, os quais têm vasta ocorrência na bacia.

O Membro Assistência caracteriza este episódio transgressivo principal da bacia (CASTRO, 1989) e apesar da Formação Irati ser aceita como a principal camada *datum* do Neopaleozóico, permanecem dúvidas quanto a sua continuidade (MENDES, 1967). Um exemplo são as diferenças litológicas entre São Paulo, onde destacam-se os calcários e o sul do Paraná, onde os folhelhos se sobressaem. As mudanças na espessura da formação dão idéia de compartimentação. O autor cita ainda que em perfurações efetuadas em Pres. Epitácio, Estado de São Paulo, não há menção da presença da Formação Irati entre as Formações Palermo e Estrada Nova. Segundo HACHIRO (1996), “no Neopermiano, o controle estrutural exercido por feições paleogeográficas condicionaram as características e a distribuição espacial de fácies e sistemas deposicionais do Subgrupo Irati”. No tocante a este aspecto, FERREIRA (1982), refere que ao final do Permiano Inferior, a região onde atualmente está situado o Arco de Ponta Grossa, compreendida entre os alinhamentos de São Jerônimo-Curiúva e do Rio Alonzo (figura 4), atuou como uma barreira soerguida, dividindo a Bacia do Paraná em

compartimentos, ou seja, originando a sub-bacia de São Paulo a nordeste e a sub-bacia paranaense a sudoeste. Esta última, por sua vez, também separada da sub-bacia de Santa Catarina pelo alinhamento do Rio Piquiri. Segundo o autor, é presumível que estas condições tenham se mantido durante a sedimentação da Formação Irati, dada a ausência de discordância. Ainda de acordo com o autor, o mapa de isópacas da Formação Irati de NORTHFLEET *et al.* (1969), admite supor que, nesta época, a área entre os alinhamentos citados ainda se mantivesse soerguida, em função da inflexão das curvas e do aumento gradual das espessuras para noroeste, indicando mergulho para dentro da bacia a partir do alto estrutural.

De acordo com BIGARELLA (1971), existem muitas controvérsias no tocante à interpretação do ambiente de deposição da Formação Irati. Embora haja concordância quanto à extensão da bacia e condições de águas calmas, as maiores contradições estão em considerar o ambiente como marinho ou continental. Segundo o autor, na opinião de WHITE (1908) o ambiente seria continental, para MENDES (1961, 1963) lagos continentais, para MAACK (1952), BEURLIN (1955), AMARAL (1967) mares epicontinentais. Posteriormente, MENDES (1984) *apud* HACHIRO (1996), baseando-se em evidências fossilíferas, entre outras, considerou a possibilidade de ambiente lagunar. Para o Membro Assistência, SCHNEIDER *et al.* (1974) admitem sedimentação em ambiente marinho de águas rasas. MEZZALIRA (1971) *in* MUSSA *et al.* (1980), descreveu acima do Membro Taquaral, crustáceos do gênero *Paulocaris*, típicos de águas salobras a salinas. A favor da influência marinha, BEURLIN (1955) *apud* BIGARELLA (1971) cita a ocorrência de tipos iguais de escamas de peixes em toda a seqüência da Formação Irati. Para o Membro Taquaral, base da formação, MUSSA *et al.* (1980) relatam a ocorrência de um crustáceo do gênero *Clarkecaris*, indicativo de água doce. Segundo HACHIRO (1996), ainda não foi identificado nenhum fóssil

exclusivamente marinho para o Membro Taquaral. As ocorrências mais comuns são de crustáceos, peixes e madeiras, os quais apontam ambientes de transição e continentais.

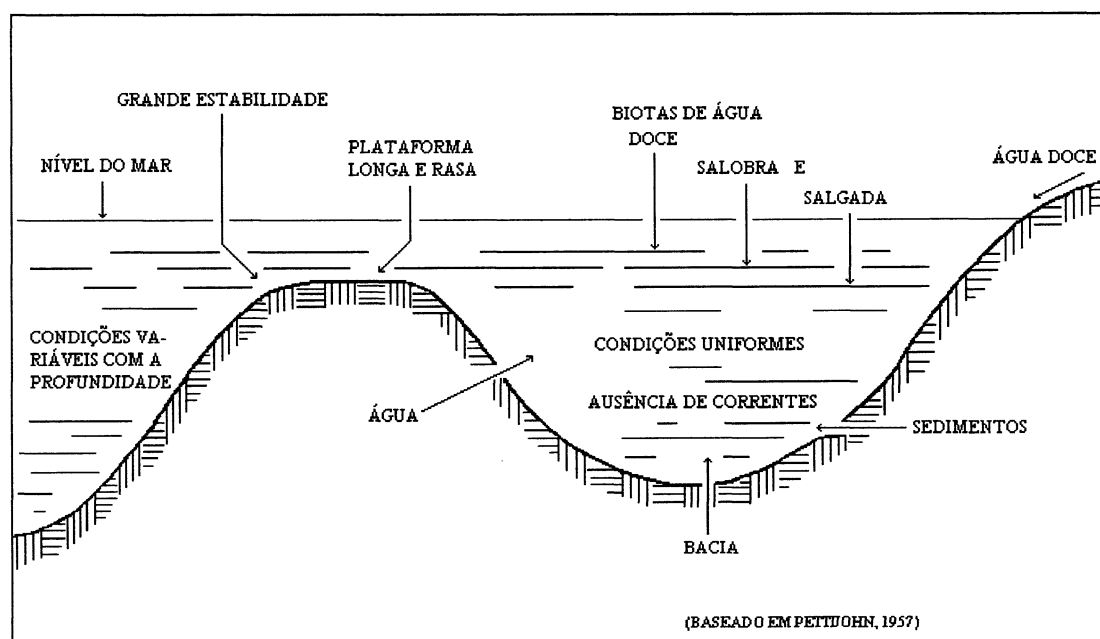
Existem também divergências entre os autores acerca da salinidade das águas do ambiente de deposição. MAACK (1952), BEURLEN (1955), AMARAL (1967) e ALMEIDA (1954) *in* BIGARELLA (1971), consideram águas salobras. Para BEURLEN (*op cit.*) a pouca salinidade seria devido à ligação restrita do ambiente de mar intracontinental com o oceano. WASHBURNE (1930) *apud* AMARAL (1975), relacionava a pobreza de fósseis do Irati à alta salinidade. WASHBURNE (1930) *apud* BIGARELLA (*op cit.*), atribuiu à alta salinidade o fato da não decomposição da matéria orgânica dos folhelhos pirobetuminosos. AMARAL (1975) também se refere a outros autores, entre os quais DEGENS, que traça uma proporção direta entre salinidade e concentração de íons de magnésio e uma proporção inversa entre estas e o índice de vida. Segundo o autor, isto se aplica bem para a Formação Irati.

MENDES *et al.* (1966) cita que a Formação Irati corresponde a uma fase redutora em meio a um ciclo deposicional mais amplo. A não continuidade vertical desta fase redutora é evidenciada pelas intercalações de siltitos cinza-escuros, semelhantes aos da Formação Serra Alta, aos quais os autores denominaram de fácies São Mateus. MAACK (1947) *in* MENDES *et al.* (*op cit.*) foi o primeiro autor a descrever este fato.

Segundo BIGARELLA (1971), não existem dúvidas quanto aos folhelhos piritosos terem sido depositados em condições anaeróbicas, num ambiente redutor. Estas condições normalmente ocorrem em bacias restritas, a grandes profundidades, em águas estagnadas onde o oxigênio é consumido pela matéria orgânica acumulada, ao contrário das águas mais superficiais, as quais circulam e são arejadas (figura 6). Condições anaeróbicas também podem estar presentes em lugares rasos, tais como lagunas ou lamas dos estuários, em função da oxidação da matéria orgânica. Porém, AMARAL (1967) *in* BIGARELLA (*op cit.*) refere que

os sedimentos da Formação Irati apresentam raras perturbações, o que condiz com águas mais profundas, distantes de ondas e correntes da superfície.

FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DE UM AMBIENTE DE BACIA RESTRITA



Fonte: Modificado de BIGARELLA (1971).

De acordo com HACHIRO (1996), “a sedimentação lenta, fina e esparsa do Subgrupo Irati deu-se sobre uma plataforma epinerítica, coberta por um mar interno e euxínico do tipo epicontinental. Fato constatável pela análise das associações de fácies, que indica a mais extensiva fase de isolamento e estagnação a que foi submetida a Bacia do Paraná”.

As bacias de circulação restrita são meios altamente redutores e com o mais baixo potencial de oxi-redução, correspondendo a um ambiente euxínico (POPP, 1987). O ambiente euxínico é definido por LEINZ & LEONARDOS (1977) como sendo o “ambiente marinho ou quase marinho, extremamente pobre em oxigênio e rico em H_2S , tornando impossível a vida orgânica mais evoluída...O sedimento proveniente deste ambiente é rico em matéria orgânica”.

O H₂S resultante da decomposição bacteriana entra na formação da pirita (FeS₂) e outros compostos sulfurosos. Os folhelhos pirobetuminosos apresentam um teor de 3 a 10% de pirita em sua composição (BIGARELLA, 1971).

CASTRO (1993) refere que a reduzida fauna dos carbonatos e a riqueza orgânica dos folhelhos demonstram um ambiente marinho em condições restritas. Segundo SCHNEIDER *et al.* (1974), um ambiente de bacia restrita possibilitou a deposição de folhelhos pirobetuminosos em associação com calcários. Estes últimos surgiram principalmente em áreas de plataforma, a exemplo do Estado de São Paulo, onde condições de maior confinamento permitiram a deposição de evaporitos.

PIRES & PETRI (1993) citam que a Formação Irati está inserida na seqüência progradacional de um megaciclo sedimentar marinho da Bacia do Paraná. De acordo com os autores, as evidências indicam que o Membro Assistência depositou-se em ambiente de plataforma carbonática, com transição (vertical e horizontal) para sedimentação litorânea parcialmente sob a influência de marés, a exemplo da Formação Corumbataí, no Estado de São Paulo.

De acordo com BEURLIN *et al.* (1955), “a fácies do Irati de São Paulo aproxima-se mais da de uma região litorânea, enquanto que a do Paraná e Santa Catarina é a fácies do interior de uma bacia e de água mais profunda”. Para MENDES (1967) a presença de esqueletos quase perfeitos de *Mesosaurus* condiz com ambiente de águas calmas.

Quanto ao aspecto climático, CASTRO (1993) considera para o Membro Assistência uma deposição em clima semi-árido com pequena taxa de sedimentação/suprimento clástico. Para MENEZES FILHO (1993) a deposição da Formação Irati deu-se em condições de maior restrição ao avanço do “mar Palermo”, configurando-se um grande golfo, onde os sedimentos do topo refletem condições de águas mais rasas e clima árido. INGERSON (1962) *in*

AMARAL (1975) faz referência a outros autores que concordam que a dolomitização requer clima quente, o qual é compatível com a grande quantidade de *Mesosaurus* e *Stereosternum*. AMARAL (1967) *apud* BIGARELLA (1971) cita climas quentes e secos, salientando a correlação entre épocas quentes e a deposição de rochas calcárias e épocas frias e a deposição de folhelhos. MENDES (1961) *apud* BIGARELLA (*op cit.*) menciona madeiras petrificadas na Formação Irati, nas quais há anéis de crescimento demonstrativos de ciclicidade climática anual. BURJACK (1984) *apud* BARBERENA (1993) refere que a presença de pólen estriados possa indicar sazonalidade climática, com estações secas sucedendo a estações úmidas.

De acordo com BARBERENA (1993), a bibliografia paleontológica existente mostra que os autores chegaram a interpretações parecidas sobre o ambiente de deposição da Formação Irati. Este paleoambiente constituía-se de um mar restrito, predominantemente calmo, pouco salino e com diferentes profundidades, embora relativamente raso. Este mar possuía uma população diversificada de acordo com os vários ambientes existentes em sua faixa de domínio.

3.3 - GEOMORFOLOGIA E HIDROGRAFIA

No tocante às características do relevo, a área está contida no segundo planalto paranaense, apresentando um relevo suavemente ondulado, de vales abertos, com altitudes que variam na faixa de 755 a 855 metros.

A área está inserida na bacia do Rio Iguaçu (Alto Iguaçu) sendo os principais rios secundários o Córrego Cachoeira e o Rio Canoas. O Córrego Cachoeira, o qual desagua no Rio Iguaçu após uma distância aproximada de 3 quilômetros do local de estudo, recebe as águas contendo as lixívias provenientes da área de mineração do xisto.

3.4 - SOLOS E VEGETAÇÃO

Os solos que ocorrem na área são classificados como cambissolos associados com latossolos e em escala menor, ocorrendo de forma localizada, solos glei (SOUZA *et al.*, 1988 *in* PORTO ALEGRE, 1995).

Os cambissolos e latossolos vermelho-escuro e vermelho-amarelo apresentam textura média ou argilosa, sendo habitualmente profundos, porosos e permeáveis. “Materiais com características físicas similares a estes tipos de solos possuem permeabilidades que variam da ordem de $7 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-5}$ cm/s” (BREDDIN, 1963 *apud* ROSA FILHO & BONACIM, 1993). Segundo MÜELLER (1982) *in* ROSA FILHO *et al.* (1998), estes tipos de solos apresentam valores de capacidade de campo situados entre 80 e 160 mm.

Os solos da área contêm, naturalmente, teores altos de alguns metais, provenientes das litologias das Formações Irati e Serra Alta (PORTO ALEGRE, 1995).

A vegetação primitiva da região constituía-se de mata de folhosa (mata subtropical limitada aos 500 a 600 metros) com araucária (*Araucaria angustifolia*) acima de 500 a 600 metros. Atualmente esta cobertura vegetal encontra-se grandemente devastada pela ação antrópica. É bastante comum na área a presença de erva-mate nativa (*Ilex paraguariensis*), a qual representa atividade econômica na região.

“Secundariamente ocorrem representantes da família *Mirtaceae* como a gabirobeira (*Campomanesia xanthocarpa*) e a pitangueira (*Eugenia uniflora*), além do cedro (*Cedrella fissilis*) e outros” (BRITZ *et al.*, 1992b *apud* PORTO ALEGRE, *op cit.*).

3.5 - CLIMA

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, ou seja, subtropical úmido mesotérmico, “de verões frescos e com ocorrência de geadas severas e

frequêntes, não apresentando estação seca” (ITCF, 1990). MAACK (1968) apresenta a divisão climática do Estado do Paraná, utilizando o sistema de Köeppen, classificando a região como zona temperada sempre úmida com mais de 5 geadas noturnas por ano. “A temperatura média anual mínima é de 13 °C, a temperatura média anual máxima é de 21 °C” (MONTTOYA & MASCHIO, 1993 *apud* PORTO ALEGRE, 1995).

A precipitação anual média verificada no período de 1938 a 1944 foi de 1.358 mm (MAACK, 1969), e no período de 1953 a 1972 foi de 1.433,5 mm (FUJITA, 1978 *apud* PORTO ALEGRE, 1995). Na área ocorre uma média de 119 dias de chuva por ano (DNAEE, 1984 *apud* BRITTEZ & SILVA, 1992a), havendo uma tendência de estação mais seca entre os meses de junho e agosto e uma estação mais chuvosa entre os meses de setembro e março (ROSA FILHO & BONACIM, 1993). As tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os valores de precipitação no período de 1985 a 1996 e as temperaturas médias de 1995 e 1996. A figura 7 é uma representação dos dados destas tabelas, no período compreendido entre janeiro de 1995 e junho de 1996.

TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM MM

Ano	Mês												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1985	6	163	66	168	16	18	89	4	120	107	79	63	899
1986	158	133	68	177	123	13	24	105	150	141	193	305	1590
1987	168	181	16	146	377	90	62	76	81	99	118	77	1491
1992	147	217	178	43	631	155	141	159	91	79	118	56	2015
1993	113	177	154	71	207	92	165	20	347	117	45	200	1708
1995	331	178	71	46	39	136	150	48	140	138	134	170	1581
1996	160	198	221	31	29	139							778

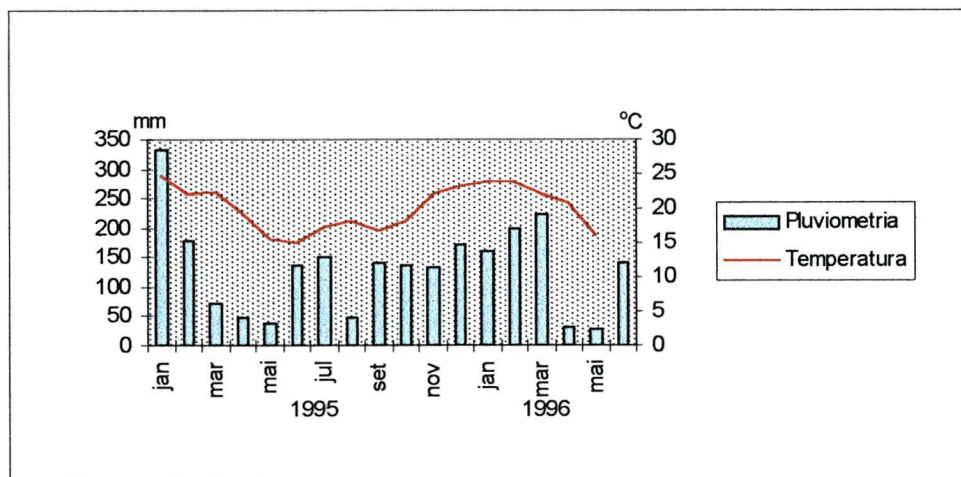
Fonte: ROSA FILHO & BONACIM (1993) e PETROBRÁS-SIX (1992/1996).

TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS EM ° C

Ano	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1995	24,7	22,1	22,5	19,4	15,5	15,1	17,3	18,2	16,8	18,3	22	23,3
1996	23,9	23,8	22,1	21	16,2							

Fonte: PETROBRÁS-SIX.

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DE TEMPERATURA MÉDIA E PLUVIOMETRIA PARA O PERÍODO DE JAN/1995 A JUN/1996, DE ACORDO COM AS TABELAS 1 E 2



Segundo o Atlas do Estado do Paraná (ITCF, 1990) para a região, a umidade relativa do ar média situa-se entre 80% e 85%.

De acordo com PORTO ALEGRE (*op cit.*), na área predominam ventos oriundos do leste (37,5%) e, secundariamente, ventos do noroeste (32,1%), estes últimos responsáveis pelas ocorrências de chuvas.

3.6 - MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DO XISTO

A mineração iniciou-se em 1972, com a Usina Protótipo do Irati-UPI operando em caráter semi-industrial para testar o processo PETROSIX de extração do óleo de xisto. Somente a partir do final de 1990 é que se deu o início da atividade em escala comercial, passando a UPI a operar continuamente em conjunto com o novo Módulo Industrial, então implantado.

As reservas brasileiras de xisto ocupam o segundo lugar a nível mundial, destacando-se entre estas a Formação Irati como a de maior importância (ZAMBERLAN & VIANA, 1988).

De acordo com BOLLMANN (1995), as reservas de xisto de São Mateus do Sul, numa área total de 140km², têm capacidade de gerar os produtos constantes da Tabela 3.

TABELA 3 - POTENCIAL DAS RESERVAS DE XISTO DE SÃO MATEUS DO SUL

-óleo de xisto (bbl)	700 milhões
-condensado (bbl)	17 milhões
-GLP (t)	9 milhões
-gás de xisto (m ³)	25 bilhões
-enxofre (t)	18 milhões

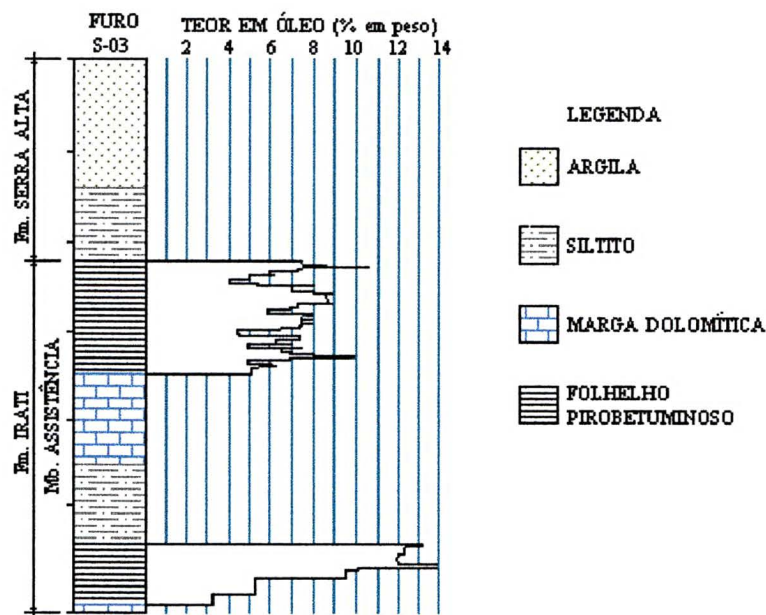
Fonte: PETROBRÁS (1990) *in* BOLLMANN (1995).

A lavra do xisto é realizada a céu aberto, seguindo uma disposição em tiras de 30 metros de largura e 900 metros de comprimento, e deverá estender-se numa área total prevista de 402,5 hectares.

O xisto é extraído das camadas superior e inferior, as quais, de acordo com PORTO ALEGRE (1995) contêm, respectivamente, 6 a 8% e 10 a 12% de óleo, através do ensaio FISCHER. Como pode ser observado na figura 8, o topo da camada inferior apresenta a maior concentração de óleo da formação (PAULA & PORTO ALEGRE, 1987). A camada

intermediária é considerada estéril porque os teores de óleo estão abaixo de 3% (MOREIRA, 1978a).

FIGURA 8 - PERFIL LITOLÓGICO DA JAZIDA DE SÃO MATEUS DO SUL



Fonte: Modificado de PAULA & PORTO ALEGRE (1987).

Inicialmente é feita a retirada do solo vegetal e da argila, os quais são conservados para futuro uso na recuperação da área. O restante do capeamento (siltito Serra Alta) e as camadas superior, inferior e intermediária sofrem o desmonte através de explosivos. A remoção é feita por escavadeira elétrica do tipo *dragline* (foto 2). O estéril (capeamento e camada intermediária) é disposto na cava da tira anterior e o xisto é transportado por caminhões até o britador primário (foto 3). Deste, é levado através de correias para outros britadores, onde reduzido à granulometria de 1/4" a 2 3/4" está pronto para a retortagem.

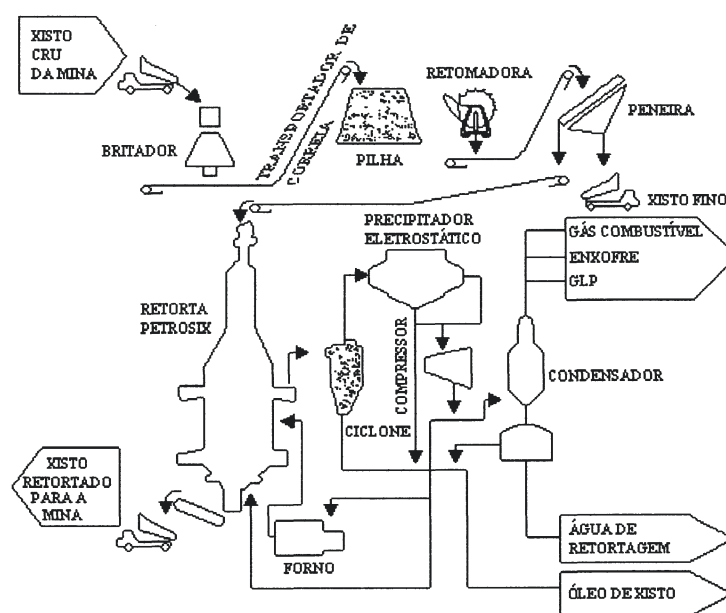
Ao chegar neste estágio, o material proveniente das duas camadas heterogêneas sofreu uma homogeneização, num grau suficiente para que o xisto retortado resultante do processo

possa ser considerado como matéria prima para a produção de outros materiais (FONSECA *et al.*, 1989a).

Na retorta, a uma temperatura de 470 a 500 °C, ocorre a pirólise (decomposição térmica) do xisto e o querogênio é liberado em forma de óleo, de gás contendo a água vaporizada e de um resíduo carbonoso contendo enxofre residual, o qual fica retido na matriz mineral. O xisto retortado do processo PETROSIX corresponde a 80-90% do volume que alimenta a retorta (FONSECA *et al.*, 1989a) e contém teores aproximados de 3% a 4% de carbono e de 3% a 4% de enxofre (FONSECA *et al.*, 1989b). O enxofre do xisto é basicamente o da pirita (COSTA NETO *et al.*, 1978 *in* FONSECA *et al.*, 1989b).

Como já comentado anteriormente, o procedimento da pirólise faz-se necessário porque o querogênio não é retirado de forma significativa através de solventes. O processo PETROSIX, desenvolvido e patenteado pela PETROBRÁS, significa o resultado de mais de 20 anos de pesquisas para obtenção da tecnologia de extração do óleo de xisto (figura 9).

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PETROSIX



Fonte: PETROBRÁS (1989) *in* BOLLMANN (1995).

São processadas diariamente cerca de 7.800 toneladas de xisto, ocorrendo um avanço da mineração de cerca de 03 hectares por mês. Na tabela 4, são fornecidos dados da produção atual da PETROSIX.

TABELA 4 - PRODUÇÃO ATUAL DA PETROSIX

PRODUTO	POR DIA	POR ANO
-xisto retornado (t)	7.800	2.650.000
-óleo de xisto (bbl)	3.870	1.310.000
-GLP (t)	50	17.000
-gás de xisto (m ³)	140.000	51.100.000
-enxofre (t)	98	33.400

Fonte: PETROBRÁS (1990) *in* BOLLMANN (1995).

3.7 - RECUPERAÇÃO DOS TERRENOS MINERADOS

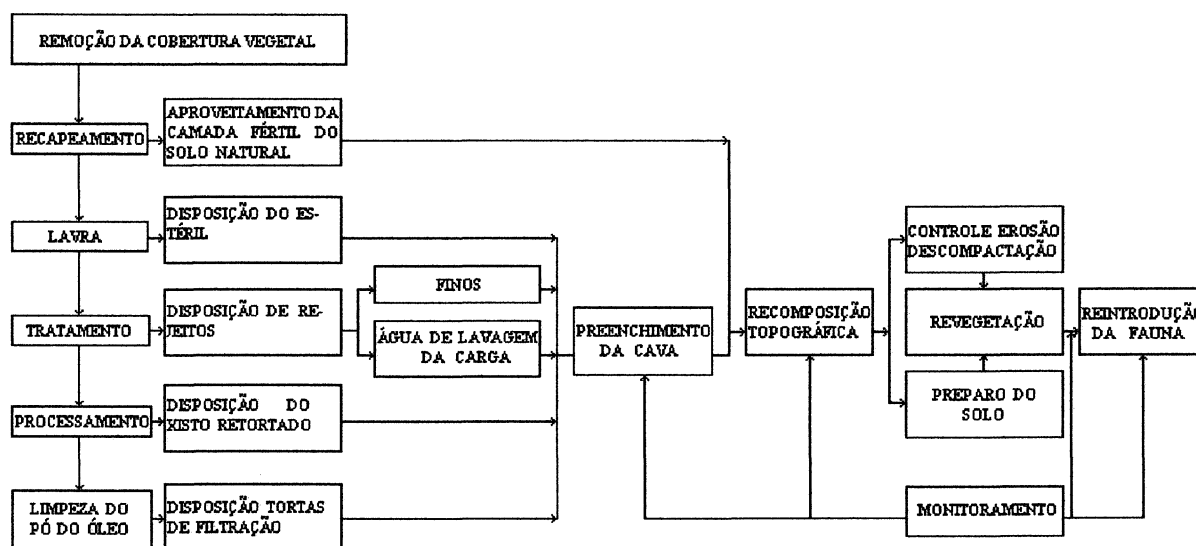
Como a mineração é efetuada a céu aberto, ocorre uma drástica alteração na paisagem local, onde a cava atinge até cerca de 30 metros de profundidade. De acordo com TERABE (1994), para a retirada do minério são movimentados mensalmente 450.000 m³ de material estéril. Posteriormente, torna-se necessário dispor este material e o xisto retornado de forma apropriada, para que a qualidade das águas do sistema seja preservada.

O xisto retornado, por conter carbono residual e pirita, está sujeito, como acontece com o rejeito piritoso do carvão de Santa Catarina, à combustão espontânea. Esta é mais uma razão para que seja feita a cobertura com uma camada de argila, a qual também vai diminuir a lixiviação e possibilitar a revegetação.

Simultaneamente ao processo de lavra é feita a recuperação da área minerada, no intuito de devolver ao meio ambiente o equilíbrio ecológico afetado pela mineração. Neste sentido, há uma grande preocupação por parte da SIX em minimizar os problemas e vem sendo dada ênfase a um programa intensivo de reabilitação das áreas degradadas. A figura 10

mostra o fluxograma de operações do programa de reabilitação adotado pela PETROSIX (TERABE, 1992). Este inclui, além da reconstituição topográfica dos terrenos através da disposição adequada dos rejeitos e do xisto retornado, a revegetação e reintrodução da fauna.

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DE OPERAÇÕES DO PROGRAMA DE REABILITAÇÃO DE ÁREAS MINERADAS



Fonte: TERABE (1992).

Outro aspecto importante, segundo TERABE (1994), é que a recuperação possibilita a ocupação e utilização futura da área, devolvendo valor econômico aos terrenos. Futuramente, nestes locais poderão ser assentados os moradores rurais que vierem a ser desapropriados com o avanço da mineração. O autor informa que o custo da recuperação dos terrenos minerados corresponde a US\$ 2,0/m², o que equivale a 2,3% do custo da produção.

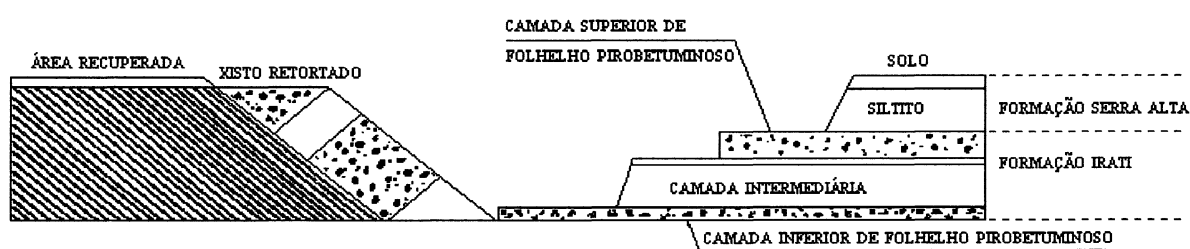
No tocante à recuperação dos terrenos minerados, a PETROBRÁS-SIX se antecipou à legislação ambiental e vem desenvolvendo pesquisas em parceria com universidades e entidades de pesquisa, desde o início da década de 70 (PORTO ALEGRE, 1994).

Existem vários projetos de estudo em andamento, os quais enfocam além da problemática da reabilitação dos terrenos minerados, a recomposição da flora e da fauna, a poluição da água e do ar, por exemplo. Neste aspecto, a SIX realizou o levantamento florístico, bem como o levantamento faunístico da região (aves, mamíferos, anfíbios e répteis). A empresa constituiu e mantém na área um viveiro de mudas florísticas e um criadouro de aves e animais, os quais já estão sendo reintroduzidos nas áreas reabilitadas.

De acordo com ZAMBERLAN & VIANA (1988), “a metodologia empregada na recuperação da área minerada consiste na recomposição da topografia anteriormente existente, moldada de acordo com os terrenos adjacentes, que não sofreram modificações, mantendo drenagem para a superfície, evitando pontos de erosão e executando rampas com declive de até 20%, compatíveis com o uso da área para fins agrícolas”.

Inicialmente, o xisto retornado é transportado por caminhões para a cava da mina, onde é depositado sobre a pilha de estéreis, incluindo o lixo urbano da cidade (foto 4). Posteriormente é feito o recobrimento com argila e solo vegetal para possibilitar a revegetação da área. A camada de solo fica com uma espessura de 0,5 a 1,0 metro (figura 11 e foto 5).

FIGURA 11 - PROCESSO DE LAVRA E RECUPERAÇÃO DOS TERRENOS MINERADOS



Fonte: PETROBRÁS (1989) *in* BOLLMANN (1995).

MASCHIO *et al.* (1992) concluíram, após estudarem amostras dos solos de áreas recuperadas e ainda sem cobertura vegetal, que o impacto da mineração não elimina a presença de microorganismos (fungos) importantes nos processos que favorecem a regeneração espontânea da vegetação nativa. Estes processos incluem a liberação do fosfato, o controle biológico natural e o transporte de minerais para as raízes das plantas.

A revegetação da área envolve um longo prazo. Primeiramente o solo é recoberto com espécies pioneiras, ou seja, pouco exigentes em relação à fertilidade e bastante resistentes. Desta maneira o solo é protegido da erosão e tem sua fertilidade aumentada, pela decomposição dos restos vegetais depositados sobre a superfície. A acidez é gradativamente eliminada do solo através da absorção dos nutrientes pelas plantas (espécies pioneiras) e através da contínua lixiviação, preparando o solo para o posterior desenvolvimento das espécies mais exigentes (foto 6).

Segundo BRITZ & SILVA (1992a), em comparação com pinus (*Pinus taeda*) e eucalipto (*Eucalyptus viminalis*), o reflorestamento com bracatinga (*Mimosa scabrella*) foi o que apresentou melhor desenvolvimento da vegetação secundária espontânea. Neste caso, verificou-se inclusive uma cobertura total do solo através destas espécies secundárias. O fato resulta, parcialmente, do número maior de folhas depositadas e de sua decomposição mais rápida. Na opinião dos autores, das 3 espécies estudadas, a bracatinga é a mais indicada como pioneira para a recuperação dos solos dos terrenos minerados.

BRITZ *et al.* (1992b) efetuaram estudos a respeito do processo sucessional da vegetação secundária, a qual surgiu espontaneamente em áreas abandonadas após cultivo intensivo, nas proximidades da SIX. Foi observado que após 5 anos, a área em processo de regeneração da cobertura vegetal apresenta indivíduos com alturas de 2 a 3 metros, predominando espécies arbóreas, as quais no prazo de alguns anos constituirão uma formação

florestal. Dentre as espécies analisadas, correspondentes aos vários estágios sucessionais, são citadas as trepadeiras, herbáceas, subarbusivas, arbustivas e arbóreas. Devido à pouca exigência quanto à fertilidade e pelo fato de serem adaptadas às condições de muita luz e produzirem muita semente, podem ser muito úteis na recuperação dos terrenos degradados.

O programa de reabilitação é completado com a reintrodução da fauna, de fundamental importância para que os ecossistemas sejam mantidos. Além da soltura de aves e animais do criadouro da empresa, ocorre também a reintrodução espontânea da fauna. Isto é viabilizado com a instalação de comedouros e abrigos, além do plantio de espécies frutíferas silvestres nos terrenos recuperados (TERABE, 1992).

Colméias de abelhas (*Apis mellifera*) foram introduzidas em áreas reabilitadas. Além da polinização das flores, possibilitando a produção de sementes que garantirão a continuidade das espécies, tem-se a produção de mel, o qual constitui um símbolo da preservação na PETROBRÁS-SIX (PORTO ALEGRE, 1994).

Entre as várias linhas de pesquisa desenvolvidas pela SIX, com vistas ao uso futuro dos terrenos reabilitados, podem ser citadas as que se direcionam para a implantação de reflorestamentos (produção de madeira ou lenha) com espécies exóticas, matas heterogêneas com espécies nativas para reintrodução da fauna e atividade agropecuária ligada ao reassentamento da população. De acordo com LUCCHESI *et al.* (1992), a utilização de pastagens (gramíneas e leguminosas) numa área recuperada de 3,0 ha na SIX, visando à produção leiteira, mostrou ser possível a utilização dos solos recompostos em atividade agropecuária. Os resultados com os experimentos nortearão a futura ocupação da área.

3.8 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O LENÇOL FREÁTICO NA ÁREA

As superfícies potenciométricas representam o lugar geométrico dos pontos que indicam a altura potenciométrica de cada uma das porções de um aquífero. As linhas de corrente são traçadas ortogonalmente às equipotenciais, considerando-se condições de permeabilidades isotrópicas para o meio onde as águas se movimentam. Os fluidos movimentam-se somente quando ocorrem variações do nível potenciométrico, entre os pontos de maior cota para os de menor cota (ROSA FILHO & BONACIM, 1993).

A potencimetria média do aquífero tende a ser constante para períodos suficientemente longos, se as condições de recarga e descarga não sofrerem mudanças significativas. Causas diretas destas mudanças podem ser a sucessão de épocas secas e úmidas, bombeamento para extração de água e abertura de trincheiras. Indiretamente, as detonações podem causar oscilações de pequena duração, em virtude da propagação de ondas elásticas (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1976).

De acordo com ROSA FILHO & BONACIM (*op cit.*), o rebaixamento do lençol freático nas áreas adjacentes à mineração do folhelho pirobetuminoso, em São Mateus do Sul, também se relaciona aos fatores mencionados. Em consequência da escavação para lavra do minério, o nível da água sofreu, localmente, rebaixamento até a base da camada inferior de folhelhos do Membro Assistência.

3.8.1 - Freático em terrenos naturais

Nos terrenos naturais a superfície do freático acompanha a configuração da topografia.

Segundo PORTO ALEGRE (1995), a maior parte das pequenas propriedades da região são abastecidas com água do aquífero freático, utilizando-se de poços-cacimba. Estes poços,

em sua maioria, seccionaram o manto alterado dos siltitos Serra Alta e alguns alcançam o topo da camada superior de folhelhos da Formação Irati.

Para o conhecimento do comportamento do freático na área, foram realizados estudos em 50 destes poços-cacimba situados nas propriedades adjacentes à mineração, por ROSA FILHO & BONACIM (1993) e RIESEMBERG (1994). São poços com profundidade média entre 2 e 8 metros, os quais representam a principal fonte de água destas populações (RIESEMBERG, 1994).

As medições efetuadas nos poços forneceram informações acerca da posição do lençol e da espessura saturada de água nos terrenos ainda não minerados. Através destes estudos, soube-se que a espessura saturada de água, compreendida entre a superfície do freático e a base do capeamento (silito Serra Alta) varia desde poucos centímetros até cerca de 7 metros (RIESEMBERG, *op cit.*). O nível potenciométrico varia desde superficial, nas porções mais baixas do terreno até cerca de 11 metros de profundidade nos pontos de maior altitude (ROSA FILHO & BONACIM, *op cit.*). Os estudos permitiram também a caracterização das direções de fluxo das águas subsuperficiais.

Nas figuras 12 e 13 têm-se, respectivamente, a localização dos poços e a representação da potencimetria referente à área então estudada, com base nos dados fornecidos por RIESEMBERG (1994). Nem todos os poços estão presentes na figura 12, porque vários situam-se fora da área de enfoque atual. Pode-se observar que, em condições normais, o fluxo da água segue naturalmente para os pontos mais baixos do terreno, em direção às linhas de drenagem.

Muitos destes poços estudados não apresentam problemas de secagem, outros há que secaram completamente durante a estiagem, sendo estas situações também influenciadas pela profundidade de cada poço (RIESEMBERG, 1994). Nas melhores condições, estes poços

possuem colunas de água superiores a 3 metros, podendo armazenar de 2.000 a 5.000 litros. Nestes casos, a extração de água não causa rebaixamentos significativos. O esgotamento ocorre nos poços com colunas de água inferiores a 2 metros, os quais representam a maioria (ROSA FILHO & BONACIM, 1993).

FIGURA 12 - POÇOS-CACIMBA ESTUDADOS POR RIESEMBERG (1994)

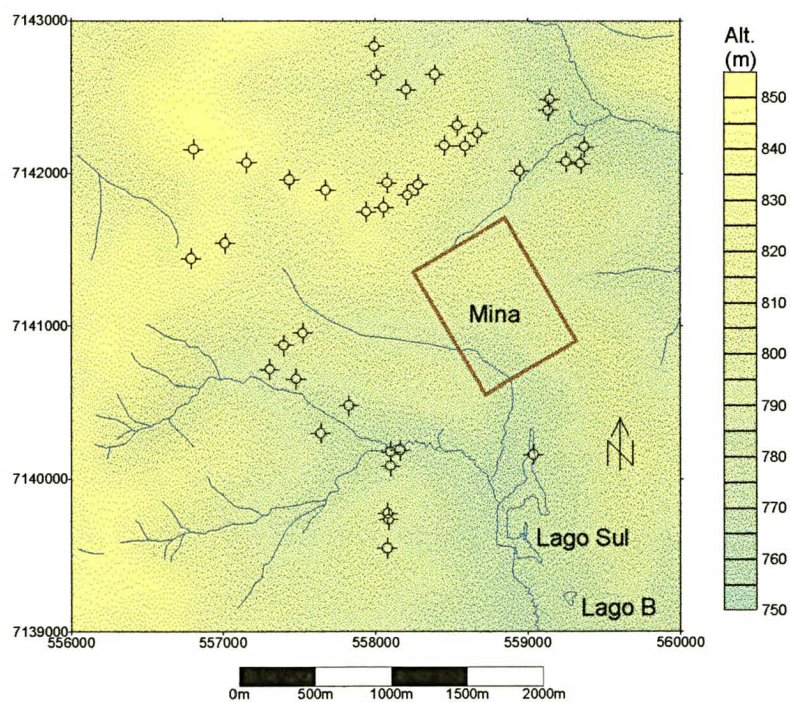
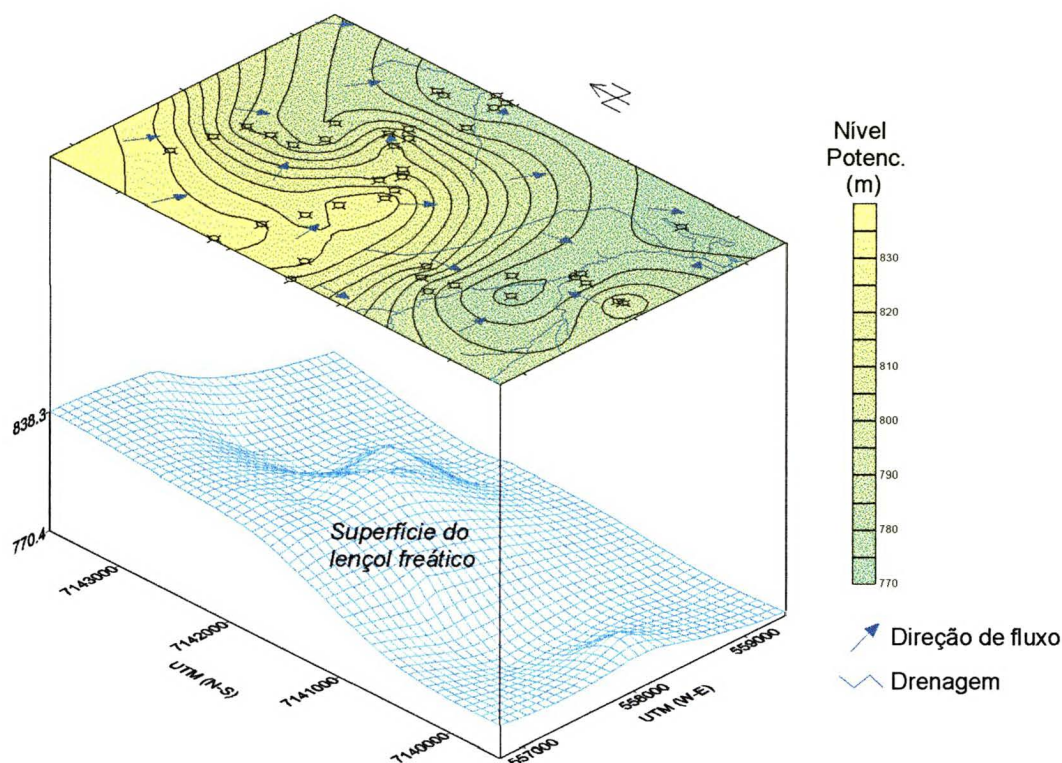


FIGURA 13 - POTENCIOMETRIA PARA A ÁREA MOSTRADA NA FIGURA 12



3.8.2 - Freático em terrenos reabilitados

Segundo BOLLMANN (1995), os principais problemas das águas na área do xisto (lagos, piezômetros da área minerada, Córrego Cachoeira e poços da vizinhança) são o baixo pH, o excessivo teor de sais dissolvidos e de compostos de enxofre. Devido ao conteúdo piritoso do folhelho, as águas que ocorrem na área, tanto superficiais quanto subsuperficiais já apresentam naturalmente um certo grau de acidez. Porém, nas áreas reabilitadas este efeito é ampliado. O fracionamento do material retornado que preenche a cava da mina favorece a percolação da água e conseqüentemente a dissolução e a lixiviação dos resíduos sulfurosos. Tal fato é realçado pela ausência de vegetação superficial no início dos trabalhos de recuperação da área, o que deixa o material mais exposto à ação das chuvas.

Segundo BASTOS (1991), o resíduo piritoso disposto em superfície, além de fornecer acidez para as águas subterrâneas através da lixiviação, libera permanentemente SO₂ para a atmosfera, poluindo o ar e acarretando chuvas ácidas que posteriormente também alterarão a qualidade das águas do sistema.

De acordo com MOREIRA (1978b), além da lixiviação do material disposto na área reabilitada, outro fator que contribui para a degradação do sistema hídrico local é o rejeito da água de retortagem. Segundo o autor, esta água contém teores aproximados de 3600 mg/l de nitrogênio amoniacal, 250 mg/l de fenol e 4350 mg/l de sulfetos.

PORTO ALEGRE (1995), refere que os óxidos e sulfetos são as maiores fontes do ferro contido nas lixívias das áreas reabilitadas, do qual foram encontrados teores de até 21 mg/l (foto 7).

Na área existem dois lagos, denominados Lago A (Sul) e Lago B. O primeiro ocupa uma antiga cava da mina do Cachoeira e apresenta em seu substrato material inerte (não retortado), recebendo contribuições constantes do Córrego Cachoeira. O Lago B situa-se na antiga mina UPI, preenchendo um buraco escavado para a drenagem da frente de lavra. Está assentado sobre material retortado e estéril, e recebe somente contribuição da chuva e do lençol freático, o qual contém as lixívias da área reabilitada.

BOLLMANN (*op cit.*), informa que durante monitoramento executado pelo ISAM/PUC-PR nestes lagos, as análises mostraram piora da qualidade das águas com o aumento da profundidade. Em parte, o que ocorre é que quanto mais próximo à superfície, a presença de luz favorece a atividade biológica, a qual atua positivamente sobre o meio aquoso. A título de exemplo, numa das amostragens do fundo do Lago A foi observado um pH de 3,5 enquanto que na superfície observam-se valores entre 5 e 7.

O autor cita que em 1991, foi constatada a presença de 42 gêneros de fitoplâncton e 17 gêneros zooplancônicos nas águas destes lagos, o que demonstra condições favoráveis ao desenvolvimento biológico. Na época da coleta, o Lago A estava com menos de três anos de formação e o Lago B com aproximadamente cinco anos.

PORTO ALEGRE (1995), informa que nas águas superficiais do Lago B foi observada estabilização do pH em torno de 6,5 e redução dos teores de sulfatos para 260 mg/l, além de ser constatada a presença de peixes e a regeneração natural de plantas aquáticas. Em 1990, estas mesmas águas superficiais apresentavam pH de 3,3 e concentrações de sulfatos da ordem de 880,8 mg/l.

Com o resultado das análises observa-se também que a qualidade das águas do Lago B é superior à das águas subsuperficiais (piezômetro próximo ao Lago B), atribuindo-se isto à ação depuradora do contato com o ar, a luz e a ação dos microorganismos. Com o propósito de intensificar o processo de depuração dos lagos, a PETROSIX tem feito o desenvolvimento da vegetação ciliar ao redor destes corpos de água.

Fica assim demonstrada a participação dos lagos na contenção dos poluentes presentes nas águas do freático, diminuindo sua carga nociva antes destas deixarem o sistema SIX (foto 8). Quanto a este processo de migração dos elementos na paisagem, PORTO ALEGRE (*op cit.*), faz referência a estimativas as quais indicam que, anualmente, são exportadas da área reabilitada da Mina UPI, cerca de 1,3 mil toneladas de substâncias dissolvidas nas águas.

Atualmente também estão sendo estudados os peixes existentes no Lago A. Estes peixes são provenientes do Córrego Cachoeira, com o qual o lago tem ligação. Os resultados deste estudo ainda não foram divulgados.

Ainda de acordo com BOLLMANN (1995), há uma melhora na qualidade das águas dos poços da Vila Bom Jesus (próxima à PETROSIX) na medida do afastamento da mineração. Diminuem a acidez, a dureza e o odor de enxofre da água.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi feita a digitalização da base cartográfica empregando-se o *software* PC ARC/INFO versão 3.4D Plus⁽¹⁾. Utilizou-se carta planialtimétrica fornecida pela PETROBRÁS-SIX (UI-000/12/119), na escala 1:20.000 e com equidistância de 5 metros entre as curvas de nível. O arquivo de dados x, y, z então criado, permitiu que com o uso do *software* Surfer 6.02⁽²⁾ fosse elaborado um modelo digital da superfície da área, sobre o qual foi plotada a rede de drenagem e os elementos de interesse para o estudo, representados essencialmente pela cava da mineração e pelos poços de monitoramento.

4.1 - CONSTRUÇÃO DOS PIEZÔMETROS EM TERRENOS NATURAIS

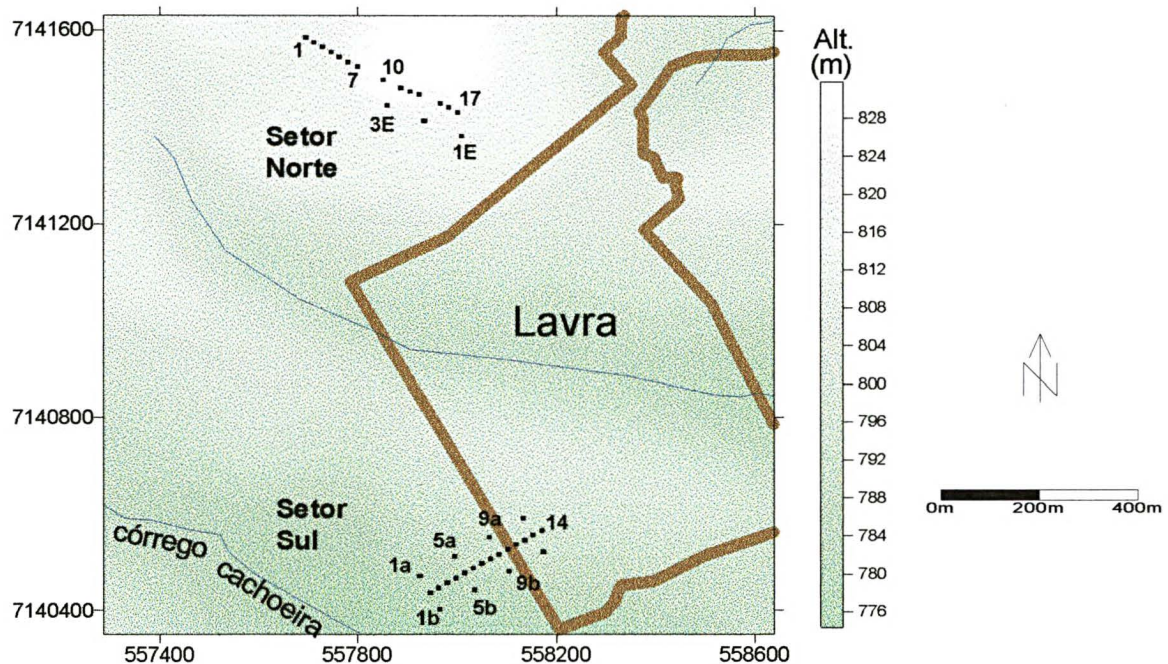
Para possibilitar o estudo do fluxo e das oscilações no nível das águas freáticas em áreas ainda não mineradas, sob influência das variações sazonais e do avanço da mineração, inicialmente foram implantadas duas redes de piezômetros, totalizando 21 furos no setor sul (ano de 1994) e 19 furos no setor norte (período 1994/1995) da Mina do Paiol Grande, local onde se processa atualmente a lavra do folhelho pirobetuminoso (figuras 14 a 16). O conjunto de piezômetros do setor sul apresenta em relação ao seu eixo principal, uma disposição perpendicular à frente de lavra. As perfurações, em sua quase totalidade, seccionaram apenas

⁽¹⁾ PC ARC/INFO versão 3.4D Plus é marca registrada de ESRI, Inc.

⁽²⁾ Surfer versão 6.02 é marca registrada da Golden Software, Inc.

os materiais que capeam a Formação Irati, correspondentes ao solo e siltitos da Formação Serra Alta. Apenas um dos piezômetros, o Pz. 13 do setor sul, atingiu o topo da camada inferior de folhelho.

FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DOS PIEZÔMETROS UTILIZADOS PARA MONITORAR O NÍVEL DA ÁGUA NO SETOR SUL E SETOR NORTE



Para as perfurações foi utilizado equipamento rotativo de propriedade da PETROBRÁS-SIX. Os furos foram executados no diâmetro de 8 polegadas (200 mm) e revestidos com tubos de PVC de 4 polegadas (100 mm), os quais tiveram o seu terço inferior perfurado com furos no diâmetro de 4 mm, de maneira a configurar uma seção filtrante. O espaço anular entre a parede da perfuração e o tubo de revestimento recebeu envoltório de pré-filtro constituído de cascalho grosseiro essencialmente quartzoso, procedente do Rio

Iguaçu. Na porção superior, acima da seção filtrante, cada piezômetro teve seu espaço anular selado com material proveniente da própria perfuração (figura 17).

FIGURA 15 - SEÇÃO ATRAVÉS DA LINHA DE PIEZÔMETROS DO SETOR SUL

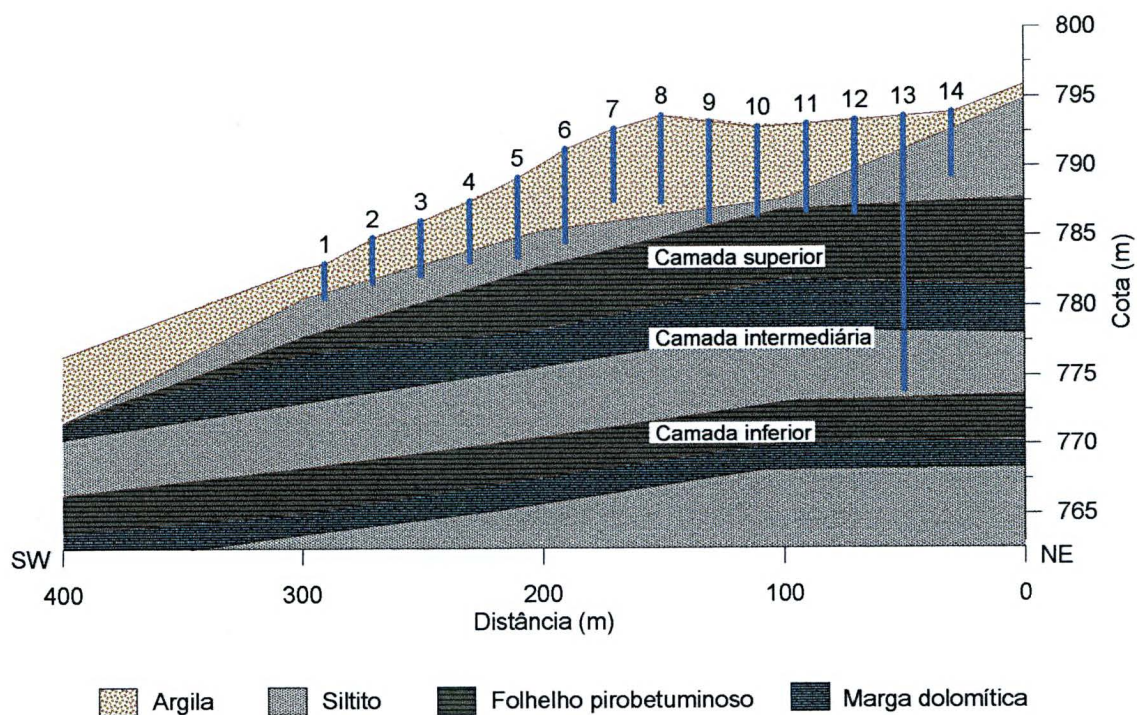
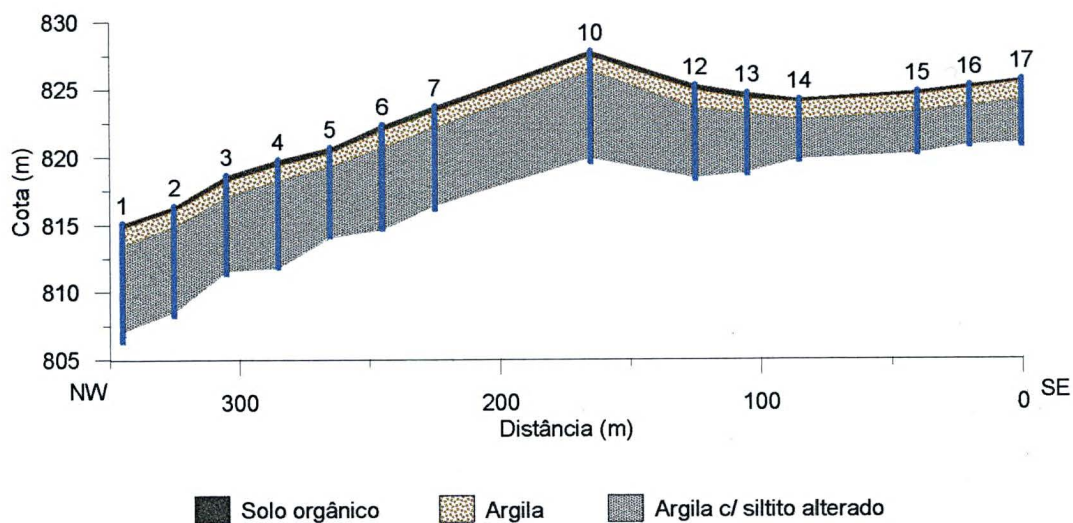


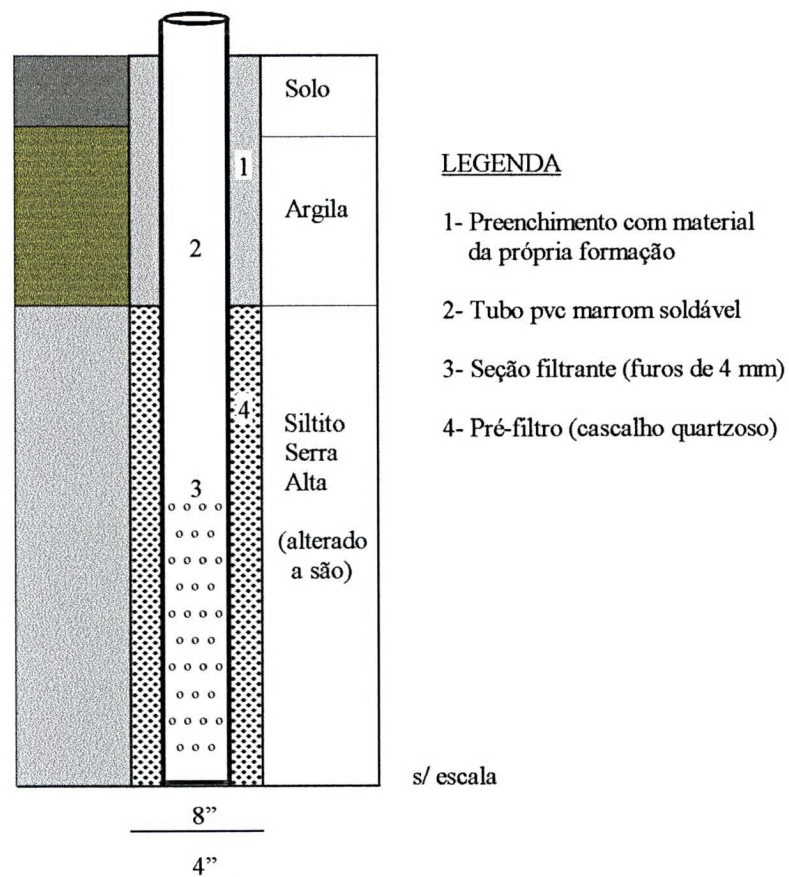
FIGURA 16 - SEÇÃO ATRAVÉS DA LINHA DE PIEZÔMETROS DO SETOR NORTE



Após sua conclusão, os piezômetros foram limpos com injeção de ar comprimido, aplicando-se o método de fluxo e refluxo da água através da seção filtrante, para eliminação do material argiloso, abundante devido à composição essencialmente argilosa do manto de alteração e do solo.

Posteriormente, foi feito o levantamento plani-altimétrico detalhado dos piezômetros por equipe da PETROBRÁS-SIX, para servir de base aos estudos da potenciométrica na área.

FIGURA 17 - PERFIL CONSTRUTIVO DOS PIEZÔMETROS DO SETOR SUL E DO SETOR NORTE



4.2 - MONITORAMENTO DA REDE PIEZOMÉTRICA

O monitoramento do nível da água nos piezômetros foi realizado diariamente (excetuando-se sábados, domingos e feriados), durante 1995 e 1996, por pessoal da PETROBRÁS-SIX. Utilizou-se sonda elétrica do tipo “*Kabellichtlot Typ 010*”, de fabricação alemã, para a obtenção dos dados em campo. Estes dados foram fornecidos em planilhas mensais, juntamente com as informações de pluviometria e temperatura provenientes da estação meteorológica da empresa.

É importante ressaltar que, durante o período de monitoramento, a mineração avançou apenas em direção aos piezômetros do setor sul, os quais foram sendo destruídos à medida em que eram atingidos pela lavra. Os dados que efetivamente conduziram a conclusões acerca da influência da mineração sobre a posição do freático, vieram das medições efetuadas nestes piezômetros do setor sul. Como a mina não avançou em direção ao conjunto de piezômetros do setor norte, naqueles poços o monitoramento apenas mostrou as oscilações de nível decorrentes das variações sazonais.

4.3 - TRATAMENTO DOS DADOS DO MONITORAMENTO

Os dados do monitoramento foram tratados com o *software* Excel 5.0⁽³⁾, gerando planilhas (tabela 5), a partir das quais foram elaborados gráficos e seções relacionando o nível de água dos piezômetros com a precipitação, distância da frente de lavra e detonações ocorridas na mina. Estes produtos possibilitaram uma melhor visualização do comportamento do nível potenciométrico no espaço de tempo, em relação àquelas variáveis.

⁽³⁾ Excel versão 5.0 é marca registrada da Microsoft Corporation.

TABELA 5 - DADOS DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA EM ALGUNS PIEZÔMETROS, ACRESCIDOS DE INFORMAÇÕES RELATIVAS À TEMPERATURA DO AR E À PRECIPITAÇÃO

MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS PIEZÔMETROS DA SEÇÃO SUL - PETROSIX (S. MATEUS DO SUL/PR)										
janeiro/95										
Dia	Pz 13a		Pz 13b		Pz 14		Temperatura do ar (°C)			Precip. (mmH ₂ O)
	Cota(m): 797,957		Cota(m): 792,175		Cota(m): 793,876		máxima	mínima	média	
	Prof. total: 5,60m		Prof. total: 6,40m		Prof. total: 4,54m					
	Prof. do Nível	Cota do N. Potenc.	Prof. do Nível	Cota do N. Potenc.	Prof. do Nível	Cota do N. Potenc.				
1										
2							29,0	20,0	24,5	25,0
3	3,977	793,980	3,404	788,771	3,693	790,183	33,0	21,0	27,0	
4	4,010	793,947	3,399	788,776	3,699	790,177	32,0	20,0	26,0	
5	4,039	793,918	3,406	788,769	3,706	790,170	32,0	21,0	26,5	5,0
6	4,053	793,904	3,424	788,751	3,703	790,173	33,0	20,0	26,5	15,0
7							27,0	19,0	23,0	23,0
8							28,0	20,0	24,0	18,0
9	2,391	795,566	0,468	791,707	0,744	793,132	30,0	19,0	24,5	10,0
10	1,981	795,976	0,504	791,671	0,228	793,648	27,0	18,0	22,5	60,0
11	1,641	796,316	0,479	791,696	0,014	793,862	22,0	17,0	19,5	53,0
12	1,891	796,066	0,514	791,661	0,264	793,612	22,0	18,0	20,0	15,0
13	2,371	795,586	0,524	791,651	0,754	793,122	29,0	19,0	24,0	1,0
14							32,0	20,0	26,0	
15							30,0	20,0	25,0	22,0
16	3,031	794,926	1,204	790,971	2,224	791,652	30,0	19,0	24,5	13,0
17	3,101	794,856	1,330	790,845	2,454	791,422	26,0	18,0	22,0	7,0
18	3,061	794,896	1,543	790,632	2,704	791,172	26,0	20,0	23,0	34,0
19	2,710	795,247	1,264	790,911	1,804	792,072	26,0	20,5	23,3	7,5
20	2,941	795,016	1,144	791,031	2,104	791,772	29,5	20,0	24,8	
21					F.lavra 70m		28,0	22,0	25,0	
22							29,0	22,5	25,8	
23	3,411	794,546	2,044	790,131	3,554	790,322				
24	3,531	794,426	2,274	789,901	3,604	790,272	33,0	19,0	26,0	
25	3,631	794,326	2,564	789,611	3,754	790,122	35,0	21,0	28,0	
26	3,721	794,236	2,764	789,411	3,754	790,122	31,0	20,0	25,5	
27	3,791	794,166	2,924	789,251	3,754	790,122	32,0	21,0	26,5	
28							32,0	20,0	26,0	
29					F.lavra 42m		32,0	19,0	25,5	
30	3,981	793,976	3,344	788,831	3,894	789,982	32,0	19,0	25,5	
31	4,039	793,918	3,494	788,681	3,734	790,142	30,5	21,0	25,8	23,0

Ainda utilizando-se o *software* Excel 5.0, foi construída seção mostrando a posição do freático em terrenos reabilitados, comparativamente aos terrenos naturais. Os dados foram obtidos no Pz 14R Sul, piezômetro implantado após a recuperação da área, na mesma posição do Pz 14 Sul dos terrenos naturais, o qual havia sido destruído pelo avanço da mineração. O furo, totalizando 33,40 metros, atingiu o substrato rochoso da base da mina à profundidade de cerca de 32 metros.

Com o *software* Surfer 6.02 foram elaborados mapas de potenciometria máxima (época chuvosa), média (época intermediária) e mínima (época seca) para a área de estudo, com vistas à determinação das direções de fluxo e de suas modificações em função da alternância climática e da aproximação da frente de lavra.

4.4 - ENSAIOS DE BOMBEAMENTO E DE RECUPERAÇÃO DO NÍVEL

Para a determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero, foram realizados ensaios de bombeamento e recuperação do nível d'água nos piezômetros (figuras 18 e 19), utilizando-se bomba submersa Grundfos modelo Redi-Flo 2. Os ensaios verificaram-se em piezômetros que permitiram bombeamento contínuo, já que em grande parte dos furos a água esgotou-se rapidamente, não oferecendo condições de observação prolongada. Neste aspecto, foram utilizados os piezômetros 01, 01a e 4 da seção norte, os quais apresentaram-se com vazão perene.

O coeficiente de transmissividade (T) é definido como sendo a capacidade de transmissão da água em toda a espessura do aquífero. É expressa em $m^3/m.h$, ou simplificando, m^2/h . Para a obtenção dos valores de transmissividade no local, foram utilizados os dados da recuperação do nível da água nos piezômetros, após os ensaios de bombeamento. Empregou-se o método de JACOB (1963), o qual utiliza a expressão $T=0,183 \times Q/\Delta s'$ onde Q é a vazão de bombeamento e $\Delta s'$ a variação do rebaixamento residual por ciclo logarítmico.

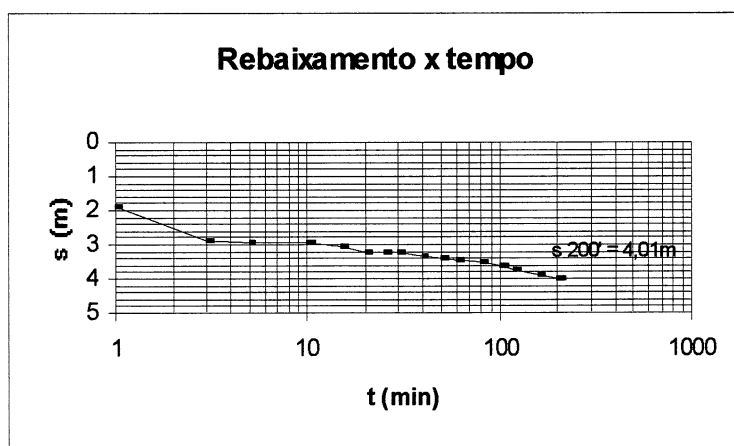
A condutividade hidráulica (K) representa a capacidade de uma rocha ou formação geológica de permitir a passagem de um fluido através dos seus vazios ou poros. É expressa pela quantidade de fluido que passa por uma seção unitária na unidade de tempo, por exemplo $m^3/m^2/s$, ou seja, m/s . Para o cálculo utilizou-se a expressão $K=T/b$, onde T é o valor de transmissividade (m^2/s) e b representa a espessura do aquífero (m).

Para a determinação do gradiente hidráulico utilizou-se a relação $I = h_1 - h_2 / d$ onde h_1 representa a cota do ponto mais alto da superfície potenciométrica; h_2 a cota do ponto mais baixo da superfície potenciométrica e d a distância entre os pontos h_1 e h_2 na superfície potenciométrica.

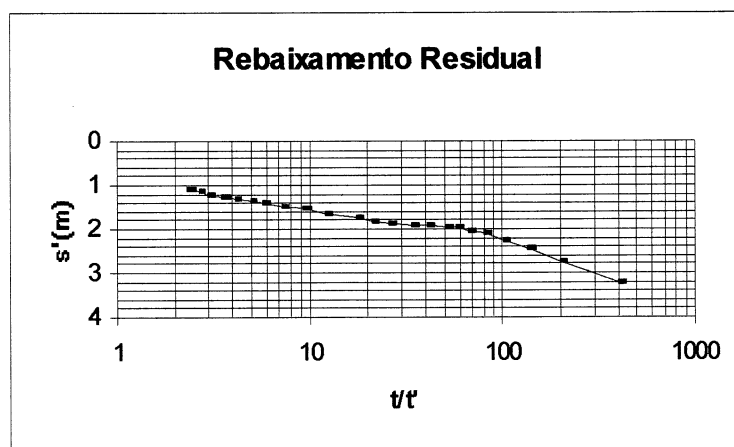
FIGURA 18 - EXEMPLO DE PLANILHA COM OS DADOS DO TESTE DE BOMBEAMENTO E RECUPERAÇÃO

FICHA DE TESTE DE BOMBEAMENTO								
INTERESSADO: PETROBRÁS-SIX								
LOCAL: Módulo Industrial do Xisto				MUNICÍPIO: S.Mateus do Sul-PR				
POÇO: Pz01 Norte			PROF.(m): 8,77		ETAPA: Unica			
BOMBA: Grundfos Redi-flo 2			T.B.(h): 3:20		Q(l/h): 597,0			
CRIVO(m): 8,27			INÍCIO(h): 10:20		N.E.(m): 3,48			
EQUIPE: Fabiano-Gemot-Aldo			DATA: 01/11/95		N.D.(m): 7,49			
T (min)	N.D. (m)	S (m)	Q (l/h)	Q/S (l/h.m)	RECUPERAÇÃO			
					T(min)	N.D.(m)	S'(m)	
1	5,35	1,87	631,5	337,7	0,5	6,68	3,20	
3	6,36	2,88	596,0	206,9	1	6,23	2,75	
5	6,42	2,94	678,0	230,6	1,5	5,90	2,42	
10	6,45	2,97	702,0	236,4	2	5,74	2,26	
15	6,56	3,08	675,0	219,2	2,5	5,58	2,10	
20	6,70	3,22	679,2	210,9	3	5,51	2,03	
25	6,70	3,22	666,0	206,8	3,5	5,45	1,97	
30	6,70	3,22	625,5	194,3	4	5,44	1,96	
40	6,80	3,32	629,4	189,6	5	5,41	1,93	
50	6,85	3,37	608,6	180,6	6	5,38	1,90	
60	6,92	3,44	586,3	170,4	8	5,33	1,85	
80	6,97	3,49	598,5	171,5	10	5,29	1,81	
100	7,10	3,62	596,5	164,8	12	5,24	1,76	
120	7,20	3,72	602,5	162,0	18	5,13	1,65	
160	7,37	3,89	619,1	159,2	24	5,01	1,53	
200	7,49	4,01	597,0	148,9	32	4,94	1,46	
					42	4,88	1,40	
					50	4,83	1,35	
					64	4,78	1,30	
					76	4,74	1,26	
					80	4,72	1,24	
					100	4,68	1,20	
					120	4,62	1,14	
					150	4,56	1,08	
OBS.: Frequência da bomba: 200 Hz Recuperação: 73,07%								

FIGURA 19 - DIAGRAMAS REPRESENTATIVOS DAS CONDIÇÕES DO TESTE



Pz 01 norte (bombeado)



Pz 01 norte (bombeado)

4.5 - COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA PARA ANÁLISE

Visando à caracterização dos aspectos hidroquímicos em área ainda não minerada, durante os ensaios de bombeamento nos piezômetros foram coletadas amostras de água para análises físico-químicas. Amostragens de águas da encosta da mina e de poços-cacimba da área também foram realizadas com a mesma finalidade. Cada coleta consistiu de duas amostras de 500 ml cada, sendo uma para a determinação dos cátions (acidificada) e outra para os ânions (não acidificada). Tem-se, a seguir, um relato da metodologia utilizada durante esta fase dos trabalhos:

*Filtragem, em membrana com malha de 0,45 μm , para reter o material em suspensão, composto principalmente por argila.

*Acidificação da amostra para análise de cátions, com ácido clorídrico 0,1 N, mantendo-se o pH até valores de 3,5 a 4,0. Objetiva impedir-se a precipitação de alguns elementos, entre os quais destaca-se o Fe, solúvel na forma Fe^{2+} e precipitado na forma Fe^{3+} .

*Verificação de alguns parâmetros físico-químicos em campo, tais como pH, condutividade elétrica, temperatura e conteúdo de sólidos totais dissolvidos. Para estas análises, foram utilizados equipamentos da marca CORNING (medidor de pH modelo PS-30, condutímetro modelo PS-17 e medidor de sólidos totais dissolvidos modelo TDS-45).

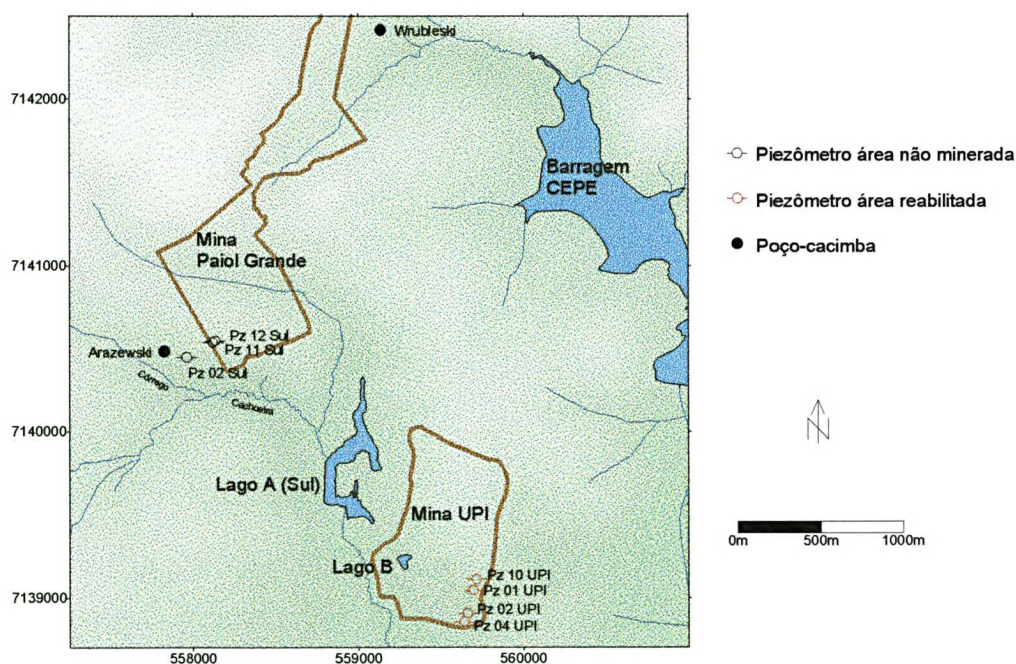
*Análise dos cátions cálcio, sódio, magnésio, potássio, ferro e manganês no Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da UFPR. Os elementos foram determinados através do espectrofotômetro de absorção atômica, modelo SP191, marca PYE-UNICAM.

*Análise de sulfatos, cloretos, sólidos totais, pH e condutividade elétrica no Laboratório da PETROBRÁS-SIX.

Informações adicionais sobre o quimismo do freático e das águas da chuva, bem como de piezômetros dos terrenos reabilitados da Mina UPI foram obtidas em PORTO ALEGRE (1995).

O estudo comparativo das análises das diferentes amostragens permitiu que fosse feita uma caracterização química das águas do sistema SIX. Na figura 20, tem-se a localização dos piezômetros e poços-cacimba cujas águas foram analisadas.

FIGURA 20 - LOCALIZAÇÃO DOS PIEZÔMETROS E POÇOS-CACIMBA DAS ANÁLISES DE ÁGUA



4.6 - TRATAMENTO DOS DADOS DAS ANÁLISES DE ÁGUA

Com o *software* Excel 5.0 foram elaborados diagramas cátion-cátion para as águas estudadas, possibilitando uma melhor visualização das diferenças químicas existentes entre estas. Para a construção do diagrama triangular contendo os polígonos de relações

intercatiônicas (PRIC) (BITTENCOURT & LIMA, 1993), foi utilizado o *software* RockWare Utilities 2.0⁽⁴⁾.

5 - RESULTADOS

5.1 - QUANTO À POTENCIOMETRIA DO FREÁTICO

5.1.1 - Alturas máximas, médias e mínimas das águas do freático

A tabela 6 contém os valores máximos, médios e mínimos dos níveis de água para os piezômetros do setor sul, obtidos durante a fase de monitoramento. Nesta, observa-se o grande número de poços que secaram durante as épocas de estiagem.

5.1.2 - Gráficos com os dados do monitoramento

Os gráficos relacionando o nível potenciométrico à precipitação, ao avanço da frente de lavra e, pontualmente, a detonações na frente de lavra, permitem visualizar que:

*A influência do regime de chuvas faz-se sentir para todos os piezômetros, com respostas rápidas e similares entre si, tanto para a elevação como para a queda do nível de água (figura 21).

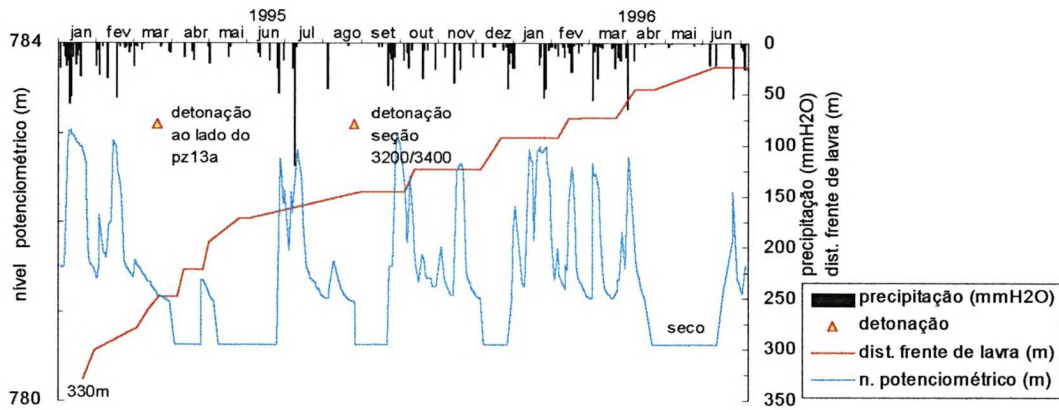
⁽⁴⁾ Rockware Utilities versão 2.0 é marca registrada da Rockware, Inc.

TABELA 6 - VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS DOS NÍVEIS DE ÁGUA
NOS PIEZÔMETROS DO SETOR SUL

PIEZÔMETROS DO SETOR SUL - 1995/96			
Piezômetro	Nível máximo(m)	Nível médio(m)	Nível mínimo(m)
01	783,02	781,35	780,62 (*)
01a	785,22	782,63	781,69 (*)
02	784,80	782,79	782,33
03	785,87	783,78	782,75
04	787,49	785,08	783,16 (*)
05	789,15	785,53	783,48 (*)
05a	790,17	786,21	784,94
05b	788,34	783,95	782,78 (*)
06	791,15	786,06	784,52 (*)
07	792,50	790,44	787,56
08	793,33	791,25	788,42
09	792,96	789,48	787,11
09a	794,58	791,45	789,56
09b	789,48	786,39	785,28 (*)
10	790,65	787,82	786,41 (*)
11	792,66	789,36	786,73 (*)
12	793,30	789,53	787,26
13	790,10	785,81	773,90 (*)
13a	796,32	793,89	792,36 (*)
13b	791,71	789,82	788,59
14	793,86	790,76	789,92
médias	790,32	787,30	786,84 (**)

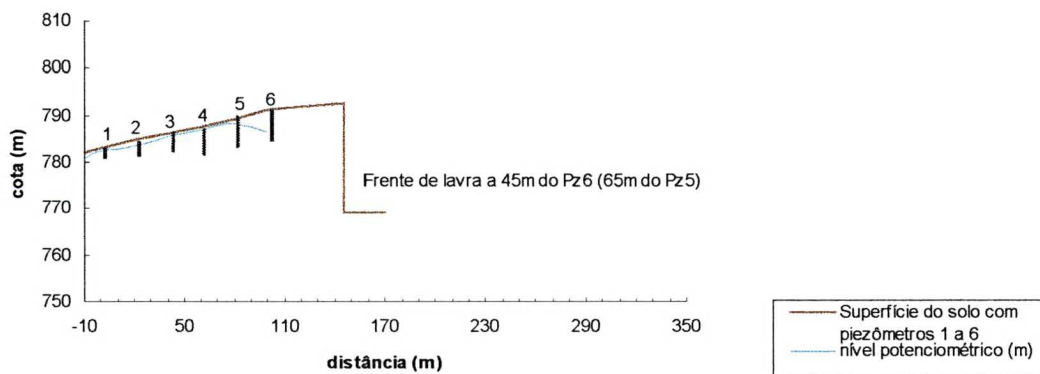
(*) Piezômetro seco. (**) Somente dos piezômetros com coluna de água.

FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E O NÍVEL DA ÁGUA NO INTERIOR DO PZ. 1 SUL (PERÍODO DE JAN/1995 A JUN/1996)



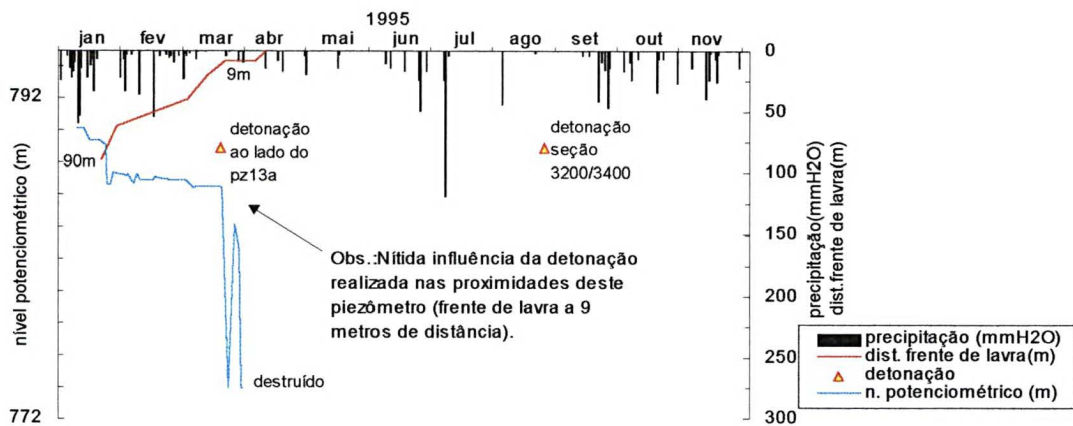
*A influência da mina sobre o lençol freático torna-se visível a partir dos 65 metros de proximidade, ocasião em que ocorreu inversão no sentido do escoamento da água na altura do Pz. 5 (figura 22).

FIGURA 22 - RELAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA COM A DISTÂNCIA À FRENTE DE LAVRA NO SETOR SUL



*As detonações ocorridas na frente de lavra causaram a secagem dos poços mais próximos, tal como aconteceu com os piezômetros 13, 13a e 9b do setor sul (figura 23).

FIGURA 23 - INFLUÊNCIA DE UMA DETONAÇÃO NO REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA (PZ. 13 SUL)



5.1.3 - Mapas potenciométricos

Os mapas potenciométricos elaborados a partir dos dados obtidos no monitoramento, permitiram a representação espacial do freático em subsuperfície e das suas direções de escoamento, possibilitando que sejam feitas as seguintes considerações:

- *O fluxo da água em subsuperfície é controlado pelas feições topográficas do terreno.
- *As direções de escoamento da água, no setor sul, variam de N 45° E a N 40° W e os sentidos são de NE para SW (principal), NW para SE, e N para S (figuras 24 e 25).
- *Os níveis potenciométricos do Pz. 10 e principalmente do Pz. 13 do setor sul, têm comportamento anômalo e não comparável ao conjunto. O Pz. 13, o mais profundo de todos

(19,70 metros), atingiu a camada inferior de folhelhos da Formação Irati, tendo por isso seu nível de água controlado pelo aquífero fraturado mais profundo. Quanto ao Pz. 10 (6,42 metros), cuja base se posicionou próximo ao topo da camada superior de folhelhos, supõe-se que também tenha recebido influência similar (figuras 24 e 25).

*O mapa de potenciometria mínima para o setor sul mostra o controle mais pronunciado exercido pelo Córrego Cachoeira em época de estiagem. A direção de fluxo é de N 30-60° E e o sentido de NE para SW (figura 26).

*Foi também gerado o mapa potenciométrico referente à data de 02/10/95 para o setor sul, quando a frente de lavra encontrava-se a 65 metros do Pz. 5. É representada a mesma situação da figura 22, chamando-se a atenção para a ocorrência de inversão do fluxo no sentido da mina. Mais precisamente, segundo o traçado das linhas equipotenciais, o fluxo passa a distribuir-se de forma radial a partir do Pz. 05. A direção geral de escoamento, do Pz. 5 para o Pz.1, continua semelhante às dos mapas de potenciometria máxima e média visualizados nas figuras anteriores (figura 27).

*Os mapas de potenciometria para o setor norte mostram-se bastante similares e demonstram o nítido controle sazonal do nível freático. As direções de fluxo variam no intervalo N70°W / N45°E e os sentidos são de NE para SW (principal), N para S e SE para NW. Como já mencionado anteriormente, a mina não avançou no sentido deste conjunto de piezômetros, permanecendo a 115 metros do piezômetro mais próximo, o Pz. 1E. A inexistência de influência da frente de lavra sobre o nível deste piezômetro, permite dizer que não há perturbação do nível freático devido à mineração, a distâncias superiores a 110-120 metros (figuras 28 e 29).

FIGURA 24 - POTENCIOMETRIA MÁXIMA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 11.01.1995,
COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE APROX. 70 M DO PZ. 14

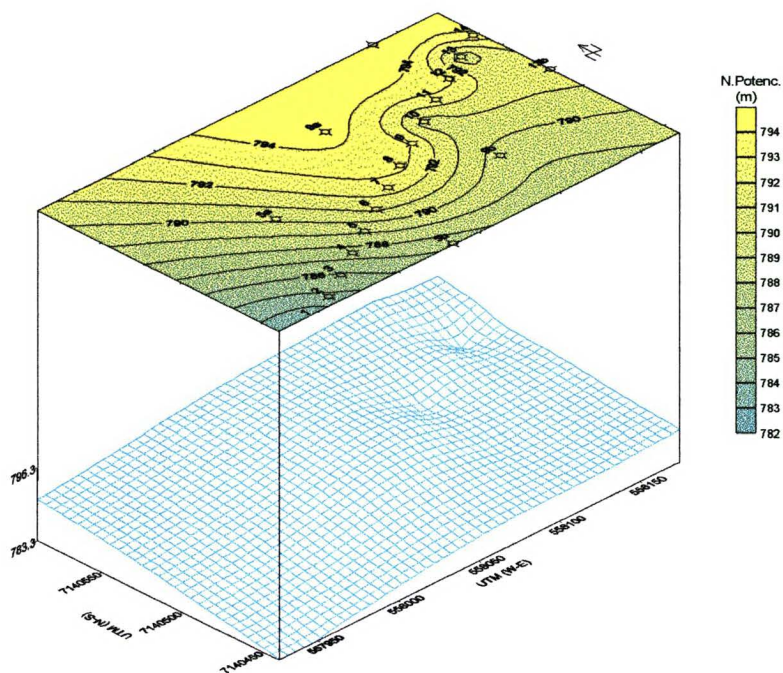


FIGURA 25 - POTENCIOMETRIA MÉDIA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 23.02.1995,
COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE APROX. 40 M DO PZ. 14

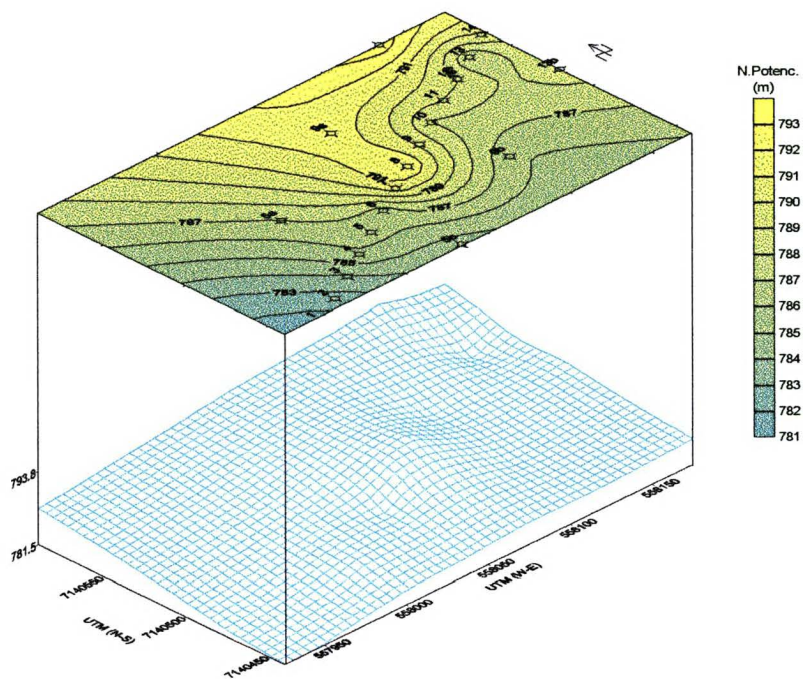


FIGURA 26 - POTENCIOMETRIA MÍNIMA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 31.05.1995
COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 52 M EM RELAÇÃO AO PZ. 7

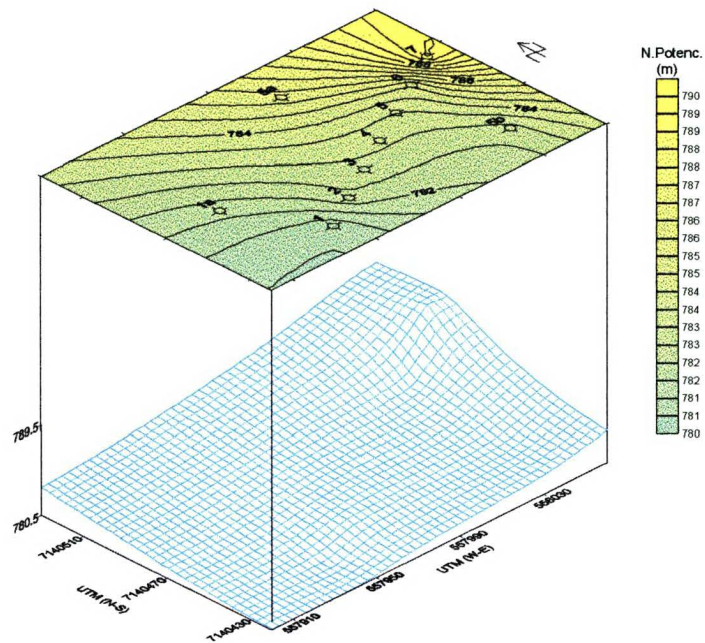


FIGURA 27 - POTENCIOMETRIA NO SETOR SUL, MEDIDA EM 02.10.1995, COM A
FRENTE DE LAVRA DISTANTE 65 M EM RELAÇÃO AO PZ. 5.
OBSERVA-SE A INVERSÃO DO FLUXO NO SENTIDO DA MINA

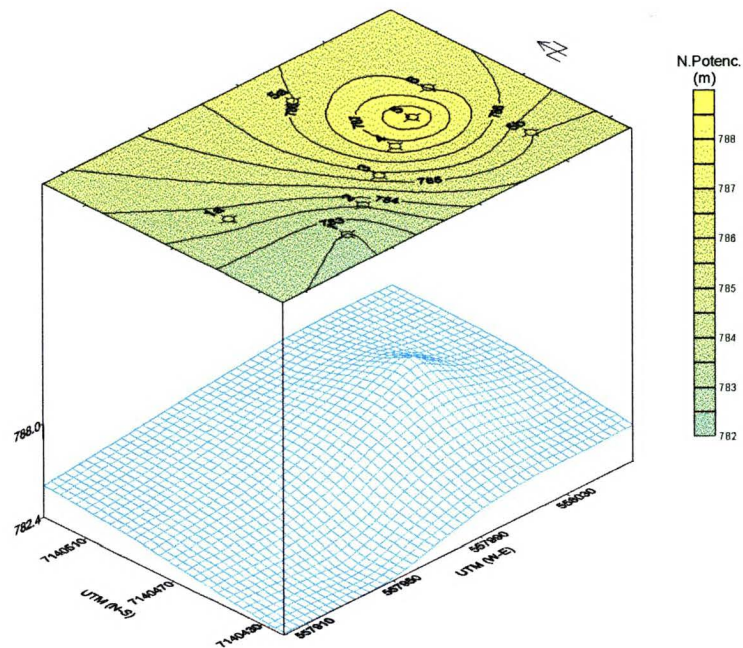


FIGURA 28 - POTENCIOMETRIA MÁXIMA NO SETOR NORTE, MEDIDA EM 27.03.1996, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 115 M DO PZ. 1E

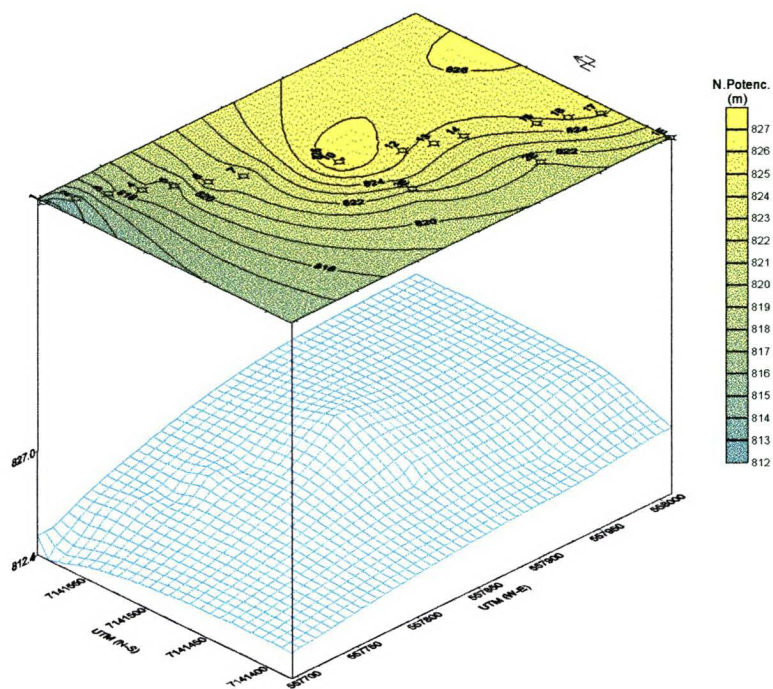
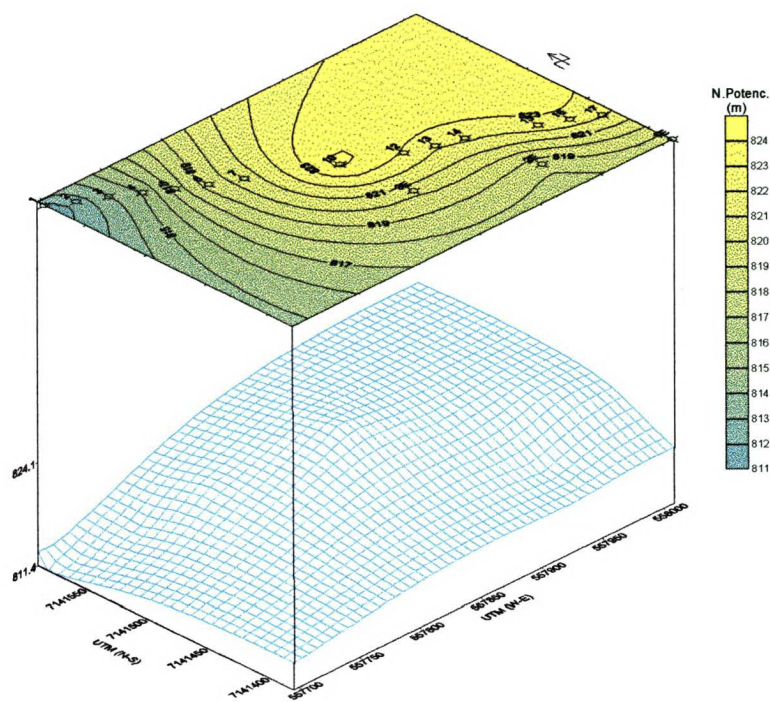


FIGURA 29 - POTENCIOMETRIA MÍNIMA NO SETOR NORTE, MEDIDA EM 29.04.1996, COM A FRENTE DE LAVRA DISTANTE 115 M DO PZ. 1E

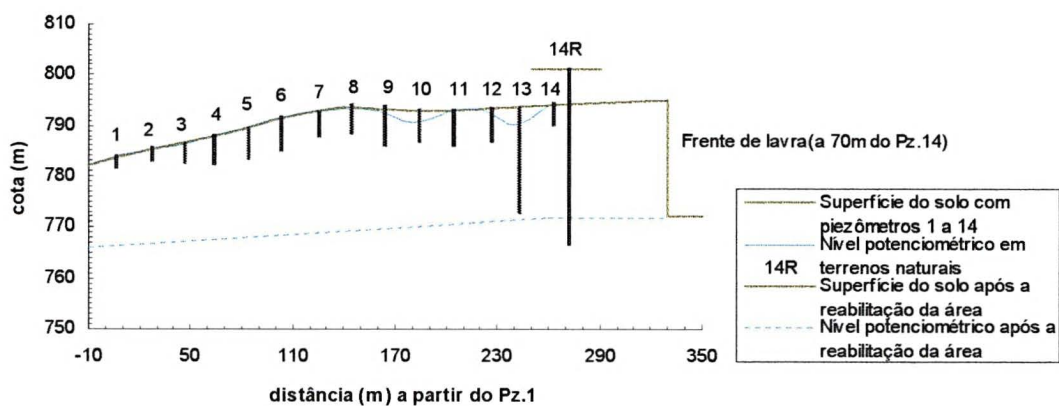


5.1.4 - Potenciometria em área reabilitada

Nas cavas preenchidas com o material estéril e o xisto retornado, o lençol freático assume uma nova posição próxima ao piso da antiga mina. Isto ocorre devido ao aumento da permoporosidade do meio, em função do fracionamento do material de preenchimento. PINTO (1981) *in* PORTO ALEGRE (1995), obteve valores de permeabilidade de até 4×10^0 cm/s para os terrenos reabilitados da Mina UPI.

As medições efetuadas no Pz. 14R sul, situado no local anteriormente ocupado pelo Pz. 14 sul dos terrenos naturais, mostraram estar o nível da água posicionado aos 29,94 metros. Este piezômetro situa-se numa cota de cerca de 7 metros acima do nível topográfico do piezômetro anterior, em função de um acréscimo na altitude da paisagem durante o processo de recuperação da área. Se usarmos como referencial a altura média de água obtida durante o monitoramento do primeiro piezômetro, ou seja, Pz. 14 sul (tabela 6), obtém-se um abaixamento da ordem de 20 metros para o nível da água nos terrenos reabilitados. Este resultado condiz com o citado por PORTO ALEGRE (1995), em seus estudos realizados na área reabilitada da antiga Mina UPI. A figura 30 ilustra a situação e possibilita uma visualização da potenciometria da área reabilitada, a qual foi inferida a partir do nível observado no Pz. 14R, com base nas cotas do piso da mina, fornecidas pela PETROBRÁS-SIX.

FIGURA 30 - NÍVEL DA ÁGUA EM TERRENOS NÃO MINERADOS (PZ. 1 A 14) E APÓS A MINERAÇÃO E REABILITAÇÃO DA MESMA ÁREA, QUANDO O LENÇOL FREÁTICO PASSA A POSICIONAR-SE PRÓXIMO AO PISO DA MINA (PZ. 14R)



5.2 - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO FREÁTICO

5.2.1 - Transmissividade e condutividade hidráulica

Os cálculos efetuados através do gráfico de rebaixamento residual forneceram valores pontuais de T e K, os quais são apresentados na tabela 7.

TABELA 7 - VALORES DE TRANSMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDOS NO SETOR NORTE DA ÁREA DE ESTUDO

POÇO BOMBEADO	T (m ³ /s.m)	K (m/s)	K (cm/s)
Pz. 1 (Setor norte)	$3,55 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-4}$
Pz. 1a (Setor norte)	$3,05 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-6}$
Pz. 4 (Setor norte)	$1,36 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-4}$

Os valores obtidos demonstram a baixa condutividade hidráulica dos terrenos siltico-argilosos da área de estudo, os quais ficam muito bem caracterizados dentro da classificação de Casagrande & Fadum, que apresenta dados referentes aos coeficientes de permeabilidade de vários solos e aos métodos mais adequados para realizar ensaios de permeabilidade neles. De acordo com CASAGRANDE & FADUM (1940) *in* TERZAGHI & PECK (1962), os terrenos possuem “boa drenabilidade” quando apresentam valores de K maiores que 10^{-4} cm/s (cascalhos e areias limpas), são de “difícil drenabilidade” quando os valores de K variam entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s (areias muito finas, siltes e mistura de areia, silte e argila) e são “praticamente impermeáveis” quando os valores de K são menores que 10^{-6} cm/s (argilas homogêneas).

5.2.2 - Gradiente hidráulico

Os valores de gradiente hidráulico obtidos para a área de estudo constam da tabela 8.

TABELA 8 - VALORES DO GRADIENTE HIDRÁULICO OBTIDOS PARA O SETOR SUL E O SETOR NORTE DA ÁREA DE ESTUDO

SETOR SUL	GRADIENTE HIDRÁULICO (I)
Potenc. máxima	$4,16 \times 10^{-2}$
Potenc. média	$3,25 \times 10^{-2}$
Potenc. mínima	$7,17 \times 10^{-2}$
Valor médio	$4,86 \times 10^{-2}$
SETOR NORTE	GRADIENTE HIDRÁULICO (I)
Potenc. máxima	$8,28 \times 10^{-2}$
Potenc. média	$7,40 \times 10^{-2}$
Potenc. mínima	$7,10 \times 10^{-2}$
Valor médio	$7,60 \times 10^{-2}$

5.3 - QUANTO AO ASPECTO QUÍMICO DO FREÁTICO

Os resultados das análises efetuadas em amostras de água dos piezômetros e poços-cacimba dos terrenos naturais, bem como os valores citados por PORTO ALEGRE (1995) para o freático, água da chuva e área reabilitada, são apresentados na tabela 9.

A tabela mostra que as águas freáticas dos terrenos naturais na área da mineração da PETROBRÁS-SIX, apresentam valores de pH baixos, de até 4,3. Tal fato deve-se à influência das litologias associadas ao folhelho pirobotuminoso, as quais contêm pirita. De acordo com PORTO ALEGRE (1995), os compostos de enxofre ocorrem em toda a espessura de sedimentos permianos. Este processo também causa o enriquecimento destas águas no íon sulfato, a exemplo do observado nas amostras dos poços-cacimba analisados (77,3 mg/l e 97,0 mg/l de SO_4^{2-}).

Os dados mostram haver uma nítida divisão entre as águas amostradas em terrenos reabilitados e as demais. Nas áreas reabilitadas, comparativamente aos terrenos naturais, as águas do freático apresentam teores excessivamente maiores em relação a parâmetros constantes da tabela 9, a exemplo do Na (0,45 para 199,3 mg/l), K (0,7 para 27,14 mg/l), Ca (0,4 para 756,8 mg/l), Mg (0,45 para 102,8 mg/l), Fe (0,16 para 21 mg/l), SO_4^{2-} (14,45 para 3519 mg/l). PORTO ALEGRE (*op cit.*), refere que os sulfatos apresentam-se como os constituintes mais numerosos das lixívia das áreas reabilitadas, tal como mostrado nas análises citadas.

O diagrama triangular da figura 31 contém os polígonos de relações intercatiônicas (BITTENCOURT & LIMA, 1993), os quais definem 2 grupos de águas para o sistema SIX. Neste, está representada a composição catiônica principal destas águas, em percentagem de miliequivalentes por litro. Os valores que limitam os polígonos são apresentados na tabela 10.

TABELA 9 – PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS DE ÁGUAS DA ÁREA DE MINERAÇÃO DO FOLHELHO
PIROBETUMINOSO EM SÃO MATEUS DO SUL – PR

LOCAL	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cond.	pH	T	Cl ⁻	Sólidos totais	HCO ₃ ⁻
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μS/cm		°C	mg/l	mg/l	mg/l
Pz. 12 Sul	0,45	0,7	0,4	0,45	0,16	0,06	14,45	4	...	25	n.d.	64,8	...
Pz. 02 Sul	6,44	7,36	7,5	8,34	ND	0,5	...	...	...	...	...	...	...
Pz. 11 Sul	1,87	2,56	4,45	2,27	0,5	1,73	...	...	...	...	...	...	...
Encosta da Mina	1,03	1,72	0,42	1,23	...	0,07	...	...	...	...	...	...	...
Cacimba (Arazewski)	7,81	2,75	2,47	2	...	...	77,3	75	5,3	19,8	n.d.	n.d.	...
Cacimba (Wrubleski)	9,28	2,75	4,9	4,62	...	...	97	95	5,7	19,6	n.d.	traços	...
Chuva ¹	0,8	0,44	0,18	0,18	...	...	4,5	...	4,2	...	1,4	46	6,1
Freático ¹	3	2,6	4	2,43	0,54	...	2,65	...	4,3	...	2,4	...	3
Pz. 01 A. Reabilitada ¹	76,32	13,04	662,8	102,8	7,77	...	2060	...	6,3	21	5	...	99,43
Pz. 02 A. Reabilitada ¹	95,25	27,14	581,3	98,9	8,15	...	1796	...	6,7	24	3	...	191,89
Pz. 04 A. Reabilitada ¹	199,3	19,02	669,1	99,1	21	...	3519	...	6,6	23	7	...	210,64
Pz. 10 A. Reabilitada ¹	47,53	19,93	756,8	98,7	3,4	...	1845	...	7	22	9	...	154,09

Fonte: ¹ PORTO ALEGRE (1995)

(n.d.): Não detectado

FIGURA 31 - DIAGRAMA TRIANGULAR CONTENDO OS POLÍGONOS DE RELAÇÕES INTERCATIÔNICAS (PRIC) DE ÁGUAS DO SISTEMA SIX

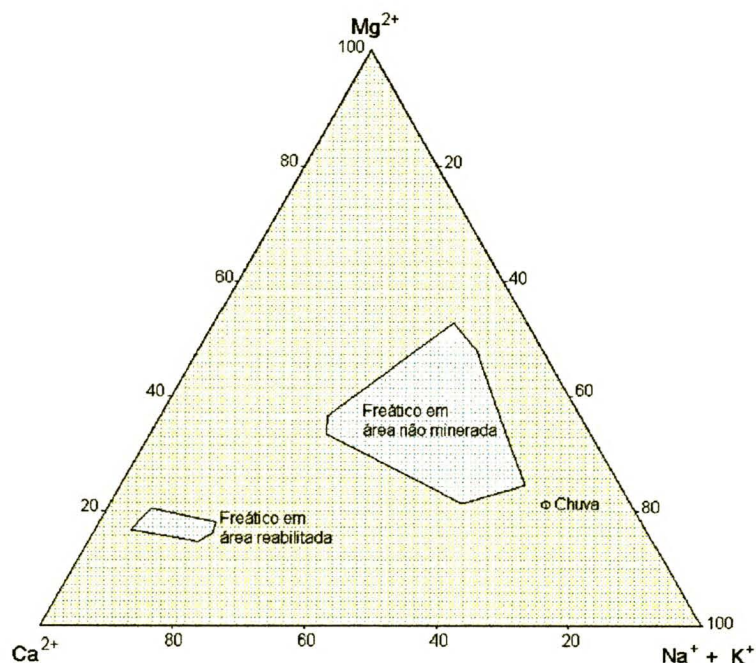


TABELA 10 - VALORES LIMITES PARA OS POLÍGONOS DE RELAÇÕES INTERCATIÔNICAS CONSTANTES DA FIGURA 31

	Ca^{2+}/Mg^{2+}		$Ca^{2+}/Na^{+}+K^{+}$		$Mg^{2+}/Na^{+}+K^{+}$	
	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.
Área não minerada	1,19	0,21	1,51	0,24	1,46	0,40
Área reabilitada	4,65	3,57	14,65	3,65	3,15	0,89

As amostras retiradas dos piezômetros 01, 02, 04 e 10 (PORTO ALEGRE, 1995), caracterizam um grupo de águas que percolam o material disposto nas áreas reabilitadas. A disposição fragmentada deste material auxilia a porosidade e a oxidação, favorecendo a dissolução dos minerais. As águas freáticas ao se movimentarem através destes terrenos, tornam-se enriquecidas com altos teores de espécies dissolvidas. Estas águas são classificadas como sulfatadas cálcicas.

PORTO ALEGRE (*op cit.*), fez uma análise da estabilidade dos principais minerais presentes nas litologias das áreas reabilitadas em relação às águas percolantes. O autor refere que as águas apresentam-se próximas ao equilíbrio com a gipsita, insaturadas em relação à calcita e à dolomita e em equilíbrio com a caulinita. Estas águas também apresentam-se fortemente instáveis para os minerais de enxofre, como a pirita e a pirrotita.

O outro grupo compreende as águas sem a influência direta da mineração, classificadas como sódio-magnesianas a mistas, as quais contêm um menor teor de sólidos dissolvidos. Um exemplo é dado pelas águas do piezômetro 12 sul, cuja condutividade elétrica de 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ reflete o baixo conteúdo de sais. Tal fato sugere tratar-se de águas com uma renovação mais dinâmica, as quais apresentam pouca interação com o material do substrato.

As figuras 32 e 33 destacam bem as diferenças entre as águas dos terrenos naturais e chuva e aquelas dos terrenos reabilitados. A figura 34 mostra os teores mais elevados do íon Na^+ nas águas dos poços-cacimba, num aumento da ordem de 5 mg/l, possivelmente devido à contaminação causada pelo homem (ROSA FILHO *et al.*, 1998).

FIGURA 32 - RELAÇÃO ENTRE Ca^{2+} E Mg^{2+} EM ÁGUAS DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL

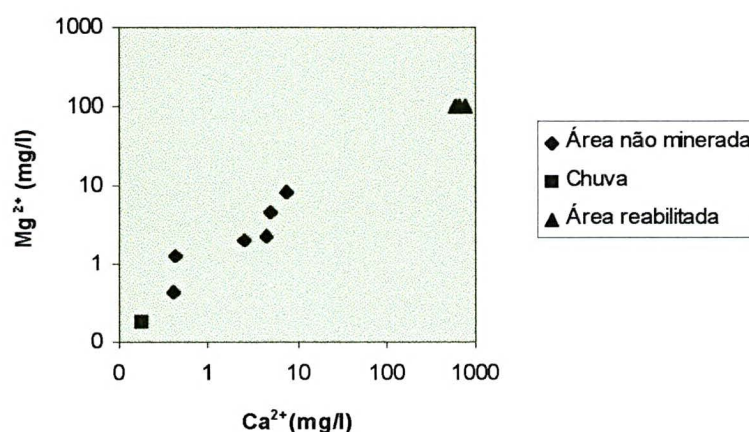


FIGURA 33 - RELAÇÃO ENTRE Na^+ E K^+ EM ÁGUAS DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL

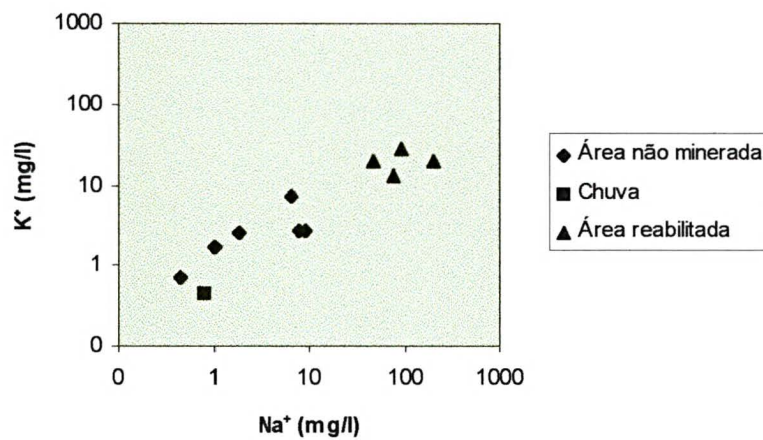
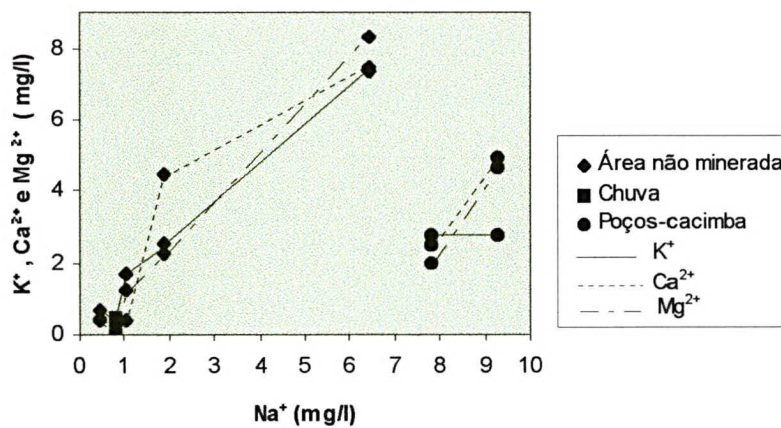


FIGURA 34 - RELAÇÕES ENTRE Na^+ E OS CÁTIONS K^+ , Ca^{2+} E Mg^{2+} EM ÁGUAS DOS TERRENOS NATURAIS E DE CHUVA DO SISTEMA SIX EM SÃO MATEUS DO SUL



6 - CONCLUSÕES

A secagem dos poços das propriedades circunvizinhas à PETROBRÁS-SIX não é causada pela abertura da cava da mineração, mas ocorre em função das variações no regime pluviométrico regional. A influência da mina sobre o nível de água nos piezômetros tornou-se visível somente a uma proximidade de 65 metros, quando ocorreu uma inversão do escoamento no sentido da mina.

Reforçando as afirmações do parágrafo anterior, os mapas potenciométricos do setor norte permitem afirmar que não há perturbação do nível freático devido à mineração, a distâncias superiores a 110-120 metros.

As detonações na mina foram responsáveis pelo abaixamento do nível de água nos piezômetros situados mais próximos à sua ocorrência.

Nas áreas reabilitadas, em função da porosidade do material que preenche a cava da mina, o freático sofre abaixamento permanente, ocupando uma nova posição próxima ao chão da antiga mina.

Quanto às características químicas, as águas freáticas na área de influência da mineração do “xisto” permiano da Formação Irati, pertencem a dois grupos distintos: as águas das áreas não afetadas pela mineração têm qualidade sódio-magnésiana a mista e apresentam baixo teor de sais dissolvidos, enquanto as que percolam através do material disposto nas áreas reabilitadas tornam-se sulfatadas cálcicas e contêm altas taxas de sais dissolvidos.

As águas dos poços-cacimba distinguem-se das águas dos piezômetros dos terrenos naturais, devido aos teores de Na^+ mais elevados, os quais sugerem contaminação por ação antrópica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMARAL, S.E. do. 1971. Geologia e petrologia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo. Boletim IGA, USP, São Paulo, n. 2, p. 3-81.
2. AMARAL, S.E. do. 1975. Sobre os dolomitos e o processo de dedolomitização na Formação Irati (Permiano) do Estado de São Paulo. Boletim IG, USP, São Paulo, n. 6, p. 21-32.
3. BARBERENA, D.C.A. 1993. Uma interpretação sobre o conhecimento paleoecológico e bioestratigráfico da Formação Irati. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., Rio Claro. Resumos... Rio Claro: UNESP. p. 64-70.
4. BASTOS, C.R.A. 1991. Poluição das águas subterrâneas. In: SEMINÁRIO BRASIL-CANADÁ DE MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE, Brasília. Anais... Brasília: DNPM. p. 259-267.
5. BEURLEN, K.; SOBRINHO, M.S.; MARTINS, E.A. 1955. Formações gonduânicas do Rio Grande do Sul. Boletim do Museu Nacional, Rio de Janeiro, n. 22, p 1-55.
6. BIGARELLA, J.J. 1971. Geologia da Formação Irati. In: SIMPÓSIO SOBRE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO XISTO, Curitiba, 1971. Conferências... Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 1-82.
7. BITTENCOURT, A.V.L.; LIMA, A.F. 1993. Contribuição à caracterização hidroquímica de águas relacionadas ao Grupo Caiuá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 4., Brasília. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Geoquímica. v. 1, p.339-341.
8. BOLLMANN, H.A. 1995. A experiência do ISAM/PUC-PR na recuperação da área degradada pela mineração do xisto em São Mateus do Sul-PR/Brasil. Trabalho apresentado ao 1º Encontro Brasil/Argentina de Especialistas em Impactos Ambientais, Curitiba. 36 p.
9. BRITZ, R.M. de; SILVA, S.M. 1992a. Avaliação da regeneração natural em reflorestamentos experimentais da Petrosix, São Mateus do Sul, PR. In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 253-263.
10. BRITZ, R.M. de; SILVA, S.M.; REISSMAN, C.B.; SANTOS FILHO, A. 1992b. Estudo da vegetação secundária como subsídio técnico para a recuperação de áreas degradadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 164-177.

11. CASTRO, J.C. de. 1989. Estratigrafia de seqüências na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1., Rio de Janeiro. Boletim de Resumos... Rio de Janeiro: SBG. p. 205.
12. CASTRO, J.C. de. 1993. Eventos, ritmos e ciclos do Membro Assistência (Formação Irati) na margem leste da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., Rio Claro. Resumos... Rio Claro: UNESP. p. 75-76.
13. CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. 1976. Hidrología subterránea. Barcelona: Ediciones Omega. v. 1, 1157 p.
14. d'OLIVEIRA, G.S.M.; BARTHOLO, J.M. 1964. Xisto: significado de um potencial. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, n. especial-fev., p. 29-48.
15. FERREIRA, F.J.F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. São Paulo, 169 p. Dissertação (Mestrado). IG. Universidade de São Paulo.
16. FERREIRA, F.J.F. 1984. Comments on "Palaeoecological implications of the distribution of mesosaurid reptiles in the Permian Irati sea (Paraná Basin), South America". Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 76-77.
17. FONSECA, M.V. de A.; NASCIMENTO, R.S.V.; SANTOS, P. de S.; NETO, C.C. 1989a. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento (parte 1). Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 32, n. 1/2, p. 35-39.
18. FONSECA, M.V. de A.; NASCIMENTO, R.S.V.; SANTOS, P. de S.; NETO, C.C. 1989b. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento (parte 2). Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 163-173.
19. FONSECA, M.V. de A.; NASCIMENTO, R.S.V.; SANTOS, P. de S.; NETO, C.C. 1989c. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento (parte 3). Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, p. 259-265.
20. GAMA JUNIOR, E.G. 1989. Estratigrafia genética na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1., Rio de Janeiro. Boletim de Resumos... Rio de Janeiro: SBG. p. 208-209.
21. GORDON JR., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Notas Preliminares e Estudos. Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, n. 38. (Reedição: 7^o Gondwana Symposium, DNPM, 1988, p. 67-86).
22. HACHIRO, J. 1996. O Subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. São Paulo, 196 p. Tese (Doutorado). IG. Universidade de São Paulo (inédita).

23. INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E FLORESTAS. 1990. Atlas do Estado do Paraná. Curitiba. 73 p.
24. JACOB, C.E. 1963. Recovery method for determining the coefficient of transmissivity. U.S. Geological Survey. Water supply paper. Washington, n. 15361.
25. LEINZ, V.; LEONARDOS, O.H. 1977. Glossário geológico. 2. ed. São Paulo: Ed. Nacional. 236 p.
26. LUCCHESI, L.A.C.; MORAES, A.; SANTOS, H.R.; SOUZA, M.L.P. 1992. Pastagens: um sistema de produção para a reabilitação de áreas degradadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 83-92.
27. MAACK, R. 1968. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba: Banco de Desenvolvimento do Paraná. 450 p.
28. MASCHIO, L.; GAIAD, S.; MONTOYA, L. *et al.* 1992. Microorganismos e auto sustentação de ecossistemas em solos alterados. In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 440-445.
29. MCKEE, R.H.; GOODWIN, R.T. 1925. Kerogen - the oil yielding material of oil shales. In: MCKEE, R.H. Shale oil. New York: The Chemical Catalog, p. 74-89.
30. MENDES, J.C.; FULFARO, V.J.; AMARAL, S.E.; LANDIM, P.M.B. 1966. A Formação Irati (Permiano) e fácies associadas. Boletim SBG, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 23-43.
31. MENDES, J.C. 1967. The Passa Dois Group (the brazilian portion of the Paraná Basin). In: BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; PINTO, I.D. Problems in brazilian Gondwana geology. Curitiba: Impr. UFPR, p. 119-166.
32. MENDES, J.C. 1984. Elementos de estratigrafia. São Paulo: Queros. 566 p.
33. MENEZES FILHO, N.R. 1993. Sistemas deposicionais do "Gondwana" na região da grande Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., Rio Claro. Resumos... Rio Claro: UNESP. p. 59.
34. MOREIRA, H.B. 1978a. Xisto - Estado atual e suas perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife. Anais... Recife: SBG. v. 6, p. 2781-2797.
35. MOREIRA, H.B. 1978b. O Xisto - Uma das opções energéticas substitutivas do petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1., Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP. v. 1, p. PIV-21 - PIV-51.

36. MUSSA, D.; CARVALHO, R.G. de; SANTOS, P.R. 1980. Estudo estratigráfico e paleoecológico em ocorrências fossilíferas da Formação Irati, Estado de São Paulo, Brasil. Boletim IG USP, São Paulo, v. 11, p. 142-149.
37. NORTHFLEET, A.A.; MEDEIROS, R.A.; MUHLMANN, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 291-346.
38. OELOFSEN, B.; ARAÚJO, D.C. 1983. Palaeoecological implications of the distribution of mesosaurid reptiles in the Permian Irati sea (Paraná Basin), South America. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 1-6.
39. PADULA, V.T. 1968. Estudos geológicos da Formação Irati-sul do Brasil. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 407-430.
40. PAULA, O.B. de; PORTO ALEGRE, H.K. 1987. A eletroresistividade aplicada à pesquisa do xisto da Formação Irati. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2., São Paulo. Coletânea de Trabalhos Técnicos...São Paulo: IBRAM. p. 29-46.
41. PETROBRAS-SIX. Ficha anual de alturas pluviométricas. 1992/1996.
42. PIRES, F.A.; PETRI, S. 1993. Estratigrafia da Bacia do Paraná (Carbonífero Superior - Triássico Inferior) no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., Rio Claro. Resumos... Rio Claro: UNESP. p. 60-61.
43. POPP, J.H. 1987. Introdução ao estudo da estratigrafia e da interpretação de ambientes de sedimentação. Curitiba: Scientia et Labor, p. 273-277.
44. POPP, J.H. 1992. Mineração e proteção ambiental: o único caminho possível... In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 467-470.
45. PORTO ALEGRE, H.K. 1994. Evolução das pesquisas em reabilitação de áreas degradadas na mineração do xisto no Brasil. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1., E SIMPÓSIO NACIONAL, 2., - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: FUPEF. p. 135-139.
46. PORTO ALEGRE, H.K. 1995. Estudo hidrogeoquímico em área reabilitada na mineração do xisto, em São Mateus do Sul, Paraná, Brasil. Curitiba, 192 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Setor de Tecnologia, UFPR.
47. RIESEMBERG, C.E. 1994. Levantamento do lençol freático na área da mina do Módulo Industrial. São Mateus do Sul: PETROBRÁS-SIX. 18 p.

48. ROSA FILHO, E.F. da; BONACIM, E. 1993. Diagnóstico da situação e proposta para solução do abastecimento de água da população lindeira à mineração de xisto em São Mateus do Sul-PR. Curitiba (Relatório interno do DEGEO-UFPR; não publicado).
49. ROSA FILHO, E.F. da; BITTENCOURT, A.V.L.; FERNANDES, A.M.P.; PORTO ALEGRE, H.K. 1998. Avaliação da alteração química e física do lençol freático em função da extração de folhelhos pirobotuminosos em São Mateus do Sul/PR. Boletim Paranaense de Geociências. Curitiba, n. 45, p. 19-33.
50. SANTOS, M.L. dos; LEITÃO, D.M. 1979. Apreciação dos recursos naturais disponíveis para utilização como fontes de energia complementares ao petróleo. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 211-226.
51. SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E. *et al.* 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: SBG. v. 1, p. 41-65.
52. TERABE, K. 1992. Programa de reabilitação das áreas degradadas pela mineração do xisto - PETROBRÁS-SIX. In: SIMPÓSIO NACIONAL - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UFPR. p. 458-461.
53. TERABE, K. 1994. A industrialização do xisto no Brasil e a questão ambiental. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1., E SIMPÓSIO NACIONAL, 2., - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: FUPEF. p. 99-102.
54. TERZAGHI, K.; PECK, R.B. 1962. Mecânica dos solos na prática da engenharia. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S/A. 659 p.
55. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Biblioteca Central. 1994. Normas para apresentação de trabalhos. 2. ed. Curitiba: Ed. da UFPR, parte 2, 23 p.
56. VIEIRA, P.C.; MEZZALIRA, S.; FERREIRA, F.J.F. 1991. Mesossaurídeo (*Stereosternum tumidum*) e crustáceo (*Liocaris huenei*) no Membro Assistência da Formação Irati (P) nos municípios de Jataí e Montevidiu, Estado de Goiás. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 224-235.
57. WHITE, I.C. 1908. Relatório sobre as "coal measures" e rochas associadas do sul do Brasil. In: Carvão do Brasil. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional. p. 180-190.
58. ZAMBERLAN, E.; VIANA, R.A. 1988. Reabilitação de área minerada de xisto. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 53-57.

FOTO 1 - VISTA DO MÓDULO INDUSTRIAL DA SUPERINTENDÊNCIA DA INDUSTRIALIZAÇÃO DO XISTO - PETROBRÁS (SÃO MATEUS DO SUL)



FOTO 2 - VISTA GERAL DA FRENTE DE LAVRA, NOTANDO-SE AO FUNDO A ESCAVADEIRA TIPO *DRAGLINE* UTILIZADA PARA A REMOÇÃO DO CAPEAMENTO E DA CAMADA INTERMEDIÁRIA



(Foto cedida por G. Schicker, 1999)

FOTO 3 - REMOÇÃO E TRANSPORTE DO FOLHELHO PIROBETUMINOSO



(Foto cedida por G. Schicker, 1999)

FOTO 4 - PREENCHIMENTO DA CAVA DA MINA DURANTE A REABILITAÇÃO DA ÁREA. DISPOSIÇÃO DO “XISTO” RETORTADO (COR PRETA) SOBRE O ESTÉRIL (COR CINZA), JUNTO COM O LIXO DA CIDADE (COR BRANCA)



(Foto cedida por G. Schicker, 1999)

FOTO 5 - CORTE DE ESTRADA EM ÁREA REABILITADA, MOSTRANDO A DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO E DE ARGILA SOBRE O “XISTO” RETORTADO



FOTO 6 - ÁREA EM REABILITAÇÃO, JÁ COM A COBERTURA VEGETAL



FOTO 7 - VISTA DA CAVA DA MINA COM A ÁGUA CAPTURADA DO LENÇOL FREÁTICO, NOTANDO-SE A CONTAMINAÇÃO DESTA PELO ELEMENTO FERRO



FOTO 8 - IMAGEM DO LAGO B, CUJAS ÁGUAS SÃO PROVENIENTES DO LENÇOL FREÁTICO DA ÁREA REABILITADA E BENEFICIAM-SE COM A AÇÃO DEPURADORA DOS AGENTES NATURAIS

