

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO/PPGEP**

Marlene Furtado da Costa

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA  
QUALIDADE DAS ÁGUAS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE MINAS A  
CÉU ABERTO: CASO DA MINA N5SUL EM CARAJÁS-PA**

Porto Alegre

2014

Marlene Furtado da Costa

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS  
ÁGUAS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE MINAS A CÉU ABERTO: CASO DA MINA  
N5SUL EM CARAJÁS-PA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, na área de concentração de Sistemas de Qualidade.

Orientador: Fernando Gonçalves Amaral, Dr.

Porto Alegre

2014

Marlene Furtado da Costa

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS  
ÁGUAS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE MINAS A CÉU ABERTO: CASO DA MINA  
N5SUL EM CARAJÁS-PA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Fernando Gonçalves Amaral, Dr.  
Orientador PPGEP/UFRGS

---

Prof. José Luiz Duarte Ribeiro, Dr.  
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Márcia Elisa Soares Echeveste, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Leonardo de Almeida Queiroz, Dr. (VALE/ DIFN)

Marcelo Roberto Barbosa, Dr. (VALE/DIPF)

## **Dedicatória**

À minha filha **Rafaela Furtado da Costa Ribeiro**, que me ensinou que há um amor maior, incondicional e infinito e, que é o motivo pelo qual tento superar qualquer desafio na vida.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por guiar meus caminhos e manter minha força em todos os momentos da vida.

Aos meus pais José Ferreira da Costa Filho e Maria Lucinéa de Brito Furtado da Costa, por terem acreditado na educação de seus filhos mesmo com todas as dificuldades e barreiras impostas pela vida.

Ao Rafael de Almeida Ribeiro, pelos anos de companheirismo, amor e paciência, ao longo dessa caminhada.

Aos meus irmãos e sobrinhos pelo amor, dedicação e ajuda em todos os momentos de minha vida.

Aos meus sogros Jorgina Hélia de Almeida Petra de Barros e Luiz Augusto Petra, pelo carinho, incentivo e dedicação à família.

Ao meu orientador Dr. Fernando Gonçalves Amaral, pela dedicação e paciência, conhecimento, orientação e visão sistêmica, sem as quais eu não teria concluído esse trabalho.

Ao João Carlos Coelho Henriques pelo incentivo e exemplo de liderança, que contribuiu para meu crescimento como profissional ao longo desses anos.

A minha equipe da gerência de meio ambiente de ferrosos norte, pela paciência, dedicação e profissionalismo de todos.

A Ciomara Rabelo de Carvalho, pela parceria nesses anos todos e delineamento das questões relevantes desse trabalho, sem os quais eu não teria sucesso.

Ao Dr. Marcelo Roberto Barbosa pela avaliação e contribuição para esse trabalho.

Ao Dr. Leonardo de Almeida Queiroz, pelo aprendizado constante, exemplo de profissional dedicado e orientações relevantes para esse trabalho.

Ao Antônio Padovezi, pelo incentivo e confiança, apoiando sempre o desenvolvimento de sua equipe.

A área de educação da Vale em Carajás e aos analistas de recursos humanos, pela dedicação e apoio a esse projeto.

## RESUMO

Indicadores de qualidade ambiental tem o objetivo de medir as variações de qualidade atribuídas pelas atividades humanas sobre os ecossistemas ambientais. Muitos desses indicadores resultam da composição de variáveis distintas voltadas para objetivos específicos diversos. Definir quais são as variáveis mais importantes dentro de um processo de avaliação ambiental é, sem dúvida, um dos maiores desafios dos responsáveis por esse tipo de estudo. Dentro do processo produtivo, é muito comum que se construa um banco de dados com informações de monitoramento da qualidade ambiental, composto de informações que não se integram de modo simplificado, indicando ações de ajustes ou mitigação de possíveis impactos sobre a qualidade do compartimento ambiental estudado. Quando se trata da avaliação da qualidade das águas é incomparável o volume de informações que geralmente se processa para viabilizar a medição da qualidade. Comumente se utilizam medições quantitativas e qualitativas de parâmetros físico-químicos, biológicos e hidrobiológicos, associados a efeitos antrópicos, geológicos, geomorfológicos, conectados entre si, ou dispersos em medições individuais. Diante do desafio de definir um modo de avaliação específico para a qualidade das águas na área de influência direta de uma mina a céu aberto, o presente trabalho propõe uma metodologia que possa indicar quais roteiros devem ser seguidos para que uma avaliação ambiental da qualidade das águas garanta que as variáveis escolhidas sejam medidas e classificadas ao longo das diferentes fases operacionais de uma mina céu aberto, iniciando no planejamento, se estendendo durante as fases de implantação, operação e descomissionamento. É essencial que as diretrizes estabelecidas sejam prontamente utilizadas pelos gestores operacionais de modo que mudanças de procedimentos operacionais possam ser realizadas em função do objetivo principal da manutenção da qualidade ambiental. A proposta metodológica foi aplicada em um projeto de mineração a céu aberto, Mina de N5Sul no Complexo Minerador de Carajás, no estado do Pará, Brasil, sendo possível efetuar medições ambientais para uma mesma rede de monitoramento da qualidade das águas em três fases distintas: planejamento, instalação e operação, onde os resultados iniciais demonstraram que mudanças nos procedimentos operacionais foram aplicados com sucesso para a manutenção da qualidade das águas no entorno da mina. Além disso, é de fundamental importância que a rede de medições seja mantida até a fase de descomissionamento, pois com a composição do banco de dados de informações será possível avaliar de forma efetiva os impactos da operação de uma mina sobre a qualidade das águas do entorno ao longo do tempo de sua vida útil.

Palavras chave: Indicadores de qualidade das águas, qualidade ambiental, plano de monitoramento ambiental, mina a céu aberto.

## ABSTRACT

Environmental quality indicators are intended to measure quality changes attributed by human activities on environmental ecosystems. Many of these indicators results from the composition of different variables have focused on several specific objectives. Defining which are the most important variables within an environmental assessment process is undoubtedly one of the greatest challenges for those responsible for this type of study. Inside of the production process, it is very common to build a database with environmental quality monitoring information consists of information that are not integrated in a simplified manner, indicating needs of adjustments or mitigation of potential impacts on the quality of environmental compartment studied. When it comes to the assessment of water quality, is unparalleled the amount of information that usually is processed to enable the measurement quality. Commonly are used quantitative and qualitative measurements of physical and chemical parameters, biological and hydro-biological associated with anthropogenic effects, geological, geomorphological, connected with each other, or dispersed in individual measurements. Faced to the challenge of defining a specific evaluation mode for the water quality in the area of direct influence of an open pit mine, this paper proposes a methodology that can indicate which routes should be followed for an environmental assessment of water quality to ensure that the chosen variables are measured and classified throughout the different operational phases of an open pit mine, starting in the planning, extending during the deployment phase, operation and decommissioning. It is essential that the guidelines established can be readily used by operational managers, so that changes in operational procedures to occur based on the primary objective of maintaining environmental quality. The methodology was applied in a mining project in the open, N5Sul mine in Complex Miner Carajás, in the state of Pará, Brazil, where it was possible to make environmental measurements for the same quality monitoring network of water in three distinct phases : planning, installation and operation, where initial results showed that changes in operational procedures have been successfully applied to the maintenance of water quality in the vicinity of the mine. Besides, it is very important that the network is maintained until the decommissioning phase, as to the composition of bank information will be possible to assess effectively the impact of a mine operation on the quality of the surrounding water over time of its life.

Key words: Quality indicators of water, environmental quality, environmental monitoring plan, open pit mining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Reações geoquímicas nos diversos compartimentos ambientais.....	31
Figura 2 - Diagrama de apresentação da solubilidade - hidróxidos e óxidos metálicos.....	35
Figura 3 - Sistemas de circulação atmosférica perturbada .....	51
Figura 4 - Mapa climático do Brasil.....	52
Figura 5 - Mapa Geológico da Mina de N5Sul em Carajás/PA .....	54
Figura 6 - Mapa hidrográfico da bacia do rio Itacaiúnas.....	56
Figura 7 - Roteiro metodológico proposto para caracterização da qualidade das águas.....	64
Figura 8 - Mapa de localização dos pontos de monitoramento .....	70
Figura 9 - Dados históricos de chuvas na estação da mina de ferro de Carajás .....	76
Figura 10 - Dados históricos de comparação sazonal ano a ano de toda a série histórica ..	77
Figura 11- Comparação volume de chuvas Jan-Mar de toda a série histórica .....	77
Figura 12 - Diagramas de condição média da qualidade da água em N5Sul .....	87
Figura 13 - Diagramas de condição média de alguns parâmetros em N5Sul.....	89
Figura 14 - Gráfico de distribuição do Índice de Qualidade das Águas – IQA.....	96
Figura 15 - Distribuição do IQA na mina de N5Sul.....	97
Figura 16 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites em MG.....	113
Figura 17 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites-sub-bacia do rio das Velhas.....	113
Figura 18 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites-sub-bacia do rio do rio Paraopeba	114

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Plano inicial de monitoramento das águas superficiais.....	<b>69</b>
Quadro 2 - Rede final de monitoramento das águas superficiais .....	<b>73</b>
Quadro 3 - Condição média para cor, oxigênio, ferro e manganês .....	<b>88</b>
Quadro 4 - Condição para cobre, chumbo, cádmio e alumínio .....	<b>88</b>
Quadro 5 - Condição média para turbidez, sólidos dissolvido, óleos e graxas e fenóis.....	<b>88</b>
Quadro 6 - Classificação do índice de qualidade das águas – IQA.....	<b>91</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração média natural de alguns metais, em rochas ígneas e sedimentares	45
Tabela 2 - Resultados de modelagem - mobilidade do Ferro sob pH e Eh diferenciados	46
Tabela 3 - Condição média de qualidade da água no ponto SCW-23	78
Tabela 4 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P37	79
Tabela 5 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P36	80
Tabela 6 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P07	81
Tabela 7 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P34	82
Tabela 8 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P10	83
Tabela 9 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P35	84
Tabela 10 - Condição média de qualidade da água superficial no ponto P33	85
Tabela 11- Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto SCW-23	92
Tabela 12 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P37	92
Tabela 13 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P36	93
Tabela 14 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P07	93
Tabela 15 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA – Ponto P34	94
Tabela 16 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P10	94
Tabela 17 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P35	95
Tabela 18 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P33	95
Tabela 19 - Concentrações de <i>background</i> para cor, oxigênio, ferro e manganês	100
Tabela 20 - Concentrações de <i>backgroun</i> para cobre, chumbo, cádmio e alumínio	101
Tabela 21- Concentrações de <i>background</i> para turbidez, sólidos, óleos e graxas e fenóis	102
Tabela 22 - Resumo dos resultados do teste de comparação de medianas	111

## **LISTA DE APÊNDICES**

APÊNDICE A .....	<b>128</b>
Tabelas de 1 a 8 com os resultados analíticos para a rede de amostragem .....	<b>128</b>
APÊNDICE B.....	<b>136</b>
Trend Test Parâmetros Ponto P07 a P37 .....	<b>136</b>



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	19
1.1.1 Objetivo Geral .....	19
1.1.2 Objetivos Específicos .....	19
1.2 JUSTIFICATIVA .....	20
1.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	22
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	22
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1 QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	23
2.2 CARACTERÍSTICA DE ÁGUAS DE SUPERFÍCIE .....	25
2.2.1 Características Hidrológicas .....	25
2.2.2 Lagos e Reservatórios.....	26
2.2.3 Rios.....	26
2.3 CONCEITOS USADOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS .....	28
2.3.1 <i>Background</i> Geoquímico .....	28
2.3.1.1 Exploração mineral.....	29
2.3.1.2 Concentração <i>background</i> de poluentes .....	29
2.3.1.3 <i>Background</i> geoquímico natural.....	29
2.3.2 Concentração Anômala .....	29
2.3.3 Concentração <i>Baseline</i> .....	30
2.3.4 Plano de Monitoramento Ambiental .....	30
2.3.5 Hidroquímica de Metais e Metalóides.....	30
2.3.6 Princípios e Processos de Controle da Água Natural .....	31
2.3.7 Reações Químicas .....	32
2.3.8 Ataque e Dissolução de Sais.....	32
2.3.9 Dissolução e Ataque no Solo.....	33
2.3.10 Reações de Interfaces .....	36

2.3.10.1 Interface gás-líquido .....	36
2.3.10.2 Interface sólido-líquido .....	37
2.3.11 Características dos Metais e Metalóide em Águas .....	38
2.3.11.1 Ferro (Fe).....	38
2.3.11.2 Manganês (Mn) .....	39
2.3.11.3 Chumbo (Pb) .....	39
2.3.11.4 Mercúrio (Hg).....	40
2.3.11.5 Cobre (Cu) .....	41
2.3.11.6 Cromo (Cr) .....	41
2.3.11.7 Zinco (Zn).....	42
2.3.11.8 Alumínio (Al) .....	42
2.3.11.9 Cádmio (Cd) .....	43
2.3.11.10 Níquel (Ni).....	43
2.3.11.11 Cobalto (Co) .....	43
2.3.11.12 Arsênio (As) .....	44
2.4 ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DOCES NO BRASIL.....	47
2.5 CLIMA E METEOROLOGIA DA REGIÃO DE CARAJÁS .....	50
2.5.1 Sistema de Circulação Atmosférica.....	51
2.5.2 Classificação Climática .....	52
2.6 GEOLOGIA DO MINÉRIO DE FERRO DA MINA DE N5SUL .....	53
2.7 ASPECTOS HIDROLÓGICOS DAS MINAS DE CARAJÁS .....	55
2.8 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	56
2.8.1 Sistema Hidrogeológico de Cobertura.....	57
2.8.2 Sistema Hidrogeológico Paleovulcânico Superior .....	58
2.8.3 Sistema Hidrogeológico Carajás .....	58
2.8.4 Sistema Hidrogeológico Parauapebas .....	59
2.8.5 Condições de Circulação da Água.....	59
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>60</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	65

4.1.1 Implantação do Plano de Monitoramento Ambiental.....	65
4.1.1.1 Seleção dos pontos amostrais .....	65
4.1.1.2 Seleção dos parâmetros analíticos .....	66
4.1.1.3 Frequência de coleta .....	66
4.1.1.4 Procedimentos de coleta e ensaios .....	66
4.1.1.5 Tratamento inicial dos resultados .....	67
4.1.1.6 Legislação aplicável .....	67
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS .....	71
4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA NA MINA DE N5SUL .....	75
4.4 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA - IQA DA MINA DE N5SUL.....	91
4.5 AVALIAÇÃO DE <i>BACKGROUND/BASELINE</i> .....	98
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>115</b>
<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre uma série de estudos essenciais para o desenvolvimento de um projeto de mineração estão aqueles associados aos impactos decorrentes da alteração de uso do solo. Muito embora os dados obtidos pela mudança da paisagem por si só já indiquem condições naturais modificadas, ao longo do desenvolvimento do projeto há de se considerar a necessidade de uma reavaliação dessas condições, de modo que haja o estabelecimento de ajustes, se necessário.

Assim, é relevante que seja aplicada na etapa de planejamento de uma nova mina a céu aberto, uma metodologia capaz de definir os procedimentos que deverão ser adotados desde a etapa de planejamento até a etapa de operação da mina propriamente dita, incluindo a fase de descomissionamento. É essencial que a qualidade ambiental possa ser medida antes, durante e após o início das intervenções de lavra para que procedimentos de ajustes ou mudanças no modo de operação sejam avaliados.

Dentre as variáveis ambientais que merecem atenção especial, estão as relacionadas ao monitoramento da qualidade das águas na área diretamente afetada pela operação de uma mina a céu aberto, de modo a assegurar que as condições iniciais de qualidade sejam mantidas, ou indicar que as possíveis alterações possam ser previstas e gerenciadas.

Há atualmente vários métodos de avaliação da qualidade das águas, que vão desde a determinação de dados de *background* geoquímico, o estabelecimento de índices de qualidade ambiental (IQA), avaliação de classes de qualidade embasadas em limites legais estabelecidos pela legislação ambiental, até a modelagem numérica de plumas de contaminação dentro das bacias hidrográficas, entre outros. Esses métodos de avaliação da qualidade das águas variam de acordo com o objetivo de cada estudo, podendo ser mais restritivos, dependendo da localização do empreendimento, do impacto provável a ser causado para os usuários do recurso natural, quando a interferência prevê mudanças significativas, ou simplesmente baseados na determinação de indicadores da qualidade ambiental para a gestão pública ou privada.

Tais metodologias são atualmente muito discutidas entre os empreendedores e os órgãos ambientais licenciadores que indicam, em muitos casos, condicionantes ambientais para

que o empreendimento possa operar, demandando comprovações rotineiras da condição inicialmente diagnosticada na fase de estudo ambiental.

Dentre os métodos mais estudados e que estão diretamente relacionados aos projetos de mineração, estão os estudos de *background* geoquímico, que buscam dar o entendimento de possíveis mudanças associadas à condição de mineralização da área a fatores que potencializam a disponibilização natural ou forçada de elementos presentes nas rochas no sistema de drenagem superficial.

Segundo Rodrigues et al. (2009), o termo *background* geoquímico foi, originalmente, introduzido em meados do século XX para diferenciar a abundância de elementos nas formações rochosas mineralizadas e não-mineralizadas. Desde então, o termo é utilizado em diferentes áreas das ciências ambientais, o que conduz à ampliação de seu significado e à geração de variantes sem haver, no entanto, uma definição precisa.

Alguns estudos discorrem sobre várias possibilidades de abordagem do tema:

- Galuszka (2006) descreve que um dos temas mais abordados atualmente em estudos ambientais, é a avaliação do *background* geoquímico, tanto para componentes dos sistemas abióticos quanto bióticos. Além disso, as modificações atribuídas aos elementos químicos englobam tanto disciplinas da área de geologia, quanto toxicologia e biologia. Assim, não é possível tratar nenhuma questão antrópica, sem passar por um embasamento nas demais áreas estreitamente relacionadas ao tema.
- Fadigas et al. (2006) relatam que é comum, durante a avaliação da extensão da poluição de uma área, comparar teores totais de elementos-traço obtidos desses locais com valores encontrados em condições naturais. Nesse caso, tais resultados são utilizados para calcular valores de *background* geoquímico, os quais permitem estabelecer padrões de qualidade ambiental, estudar o impacto de fontes de poluição antropogênicas ou, ainda, identificar fontes naturais de poluição, em uma determinada área (Reimann & Garrett, 2005; Reimann et al., 2005; Galuszka, 2006). Em caso de valores anômalos positivos, as influências antrópicas ocorrem, por definição, como contaminação (MATSCHULLAT, 2000a).

- Para Gough (1993), o significado mais comum do termo refere-se à escala de valores das concentrações de alguns elementos para um local influenciado por atividades antropogênicas.
- Plumlee (1999) apresenta nos estudos de exploração geoquímica, o termo *background* como a concentração anômala de um elemento em um material sob investigação, tais como rochas, solos, plantas ou água.
- Matschullat et al. (2000a) enfatizam a ausência de uma definição clara sobre o termo e o considera como sendo uma medida relativa a ser utilizada na distinção entre as concentrações naturais de um dado elemento e as concentrações influenciadas por atividades antrópicas. Segundo os autores, o estabelecimento de uma definição mais precisa para o termo é um passo importante que deve anteceder a sua utilização em qualquer estudo.
- Outra definição pode ser encontrada no estudo de Galuszka (2006), no qual *background* é definido como sendo uma concentração teoricamente natural de uma substância ou elemento em uma amostra, considerando as variáveis temporal e espacial da área sob investigação.
- O termo *background* geoquímico é compreendido e utilizado de forma variada entre os estudiosos das áreas ambientais, fato este que tem suscitado uma discussão acerca das diversas definições dadas ao termo nas interfaces das ciências ambientais.

Com base nos conceitos de concentração anômala, usada para compor os estudos de *background*, o presente trabalho propõe um método para avaliação da qualidade das águas na área de influência de uma nova mina a céu aberto, cuja análise de dados propõe comparar resultados de monitoramento iniciados na etapa de planejamento, se estendendo às etapas de instalação, operação e descomissionamento, indicando a sequência de procedimentos a serem adotados, além do estabelecimento de um plano de monitoramento ambiental da qualidade das águas, que possa ser aplicado de modo sistemático em todas as etapas do empreendimento minerário.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho possui os seguintes objetivos:

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia que defina os procedimentos a serem adotados pelo empreendedor para avaliar, durante as etapas de desenvolvimento de um empreendimento minerário, a influência da abertura de uma nova mina a céu aberto sobre a qualidade das águas, considerando os fatores preponderantes e específicos da sua área de influência direta, tendo como base as condições naturalmente presentes (*background*). A relevância para a definição desta metodologia se justifica principalmente quando há a necessidade de cumprimento de requisitos relacionados à conservação ambiental, embasados em legislações ambientais e normas técnicas consideravelmente rígidas, bem como aos anseios da sociedade de um modo geral.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A metodologia de avaliação da qualidade das águas de uma nova mina a céu aberto considerou especificamente os seguintes objetivos:

- Avaliação da rede de monitoramento integrante do estudo ambiental do empreendimento.
- Definição da rede de amostragem mínima capaz de caracterizar a área de influência direta da mina a céu aberto.
- Estabelecimento do plano de monitoramento ambiental a ser aplicado nas várias etapas do empreendimento.
- Eleição dos indicadores de qualidade das águas aplicáveis à operação da mina a céu aberto.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a importância da qualidade da água está bem conceituada na Política Nacional de Recursos Hídricos, que define, dentre seus objetivos, “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” (Art. 2º, Cap. II, Tit. I, Lei no 9.433) (ANA, 2005). A Política Nacional de Recursos Hídricos também determina, como uma das diretrizes de ação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, “a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade e a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental” (Art. 3º, Cap. III, Tit. I, Lei no 9.433) (ANA, 2005).

Com base nas informações disponíveis das redes de monitoramento das Unidades da Federação, foi elaborado um diagnóstico da qualidade das águas superficiais e sua tendência para o período 2001-2010. Esse diagnóstico não representa a avaliação por completo da qualidade das águas superficiais do país, já que vários Estados, principalmente na RH Amazônica, ainda não possuem redes de monitoramento (ANA, 2012).

Considerando-se todos os 1.988 pontos monitorados pelo índice de qualidade das águas - IQA, no país em 2010, tanto em áreas urbanas como rurais, observou-se condição “ótima” em 6% dos pontos monitorados, “boa” em 75%, “regular” em 11%, “ruim” ou “péssima” em 7%. Analisando-se apenas os corpos d’água em áreas urbanas, observa-se que, no ano de 2010, 47% dos pontos monitorados apresentaram condição “péssima” ou “ruim”, reflexo da alta taxa de urbanização observada no País e dos baixos níveis de coleta e tratamento de esgotos domésticos. Esses rios urbanos geralmente apresentam suas bacias em grande parte impermeabilizadas, poluídas pelos esgotos domésticos, efluentes industriais, resíduos sólidos e cargas difusas, que impactam a qualidade de vida nas cidades brasileiras, pois degradam a paisagem urbana, reduzem as oportunidades de lazer e permitem a veiculação de doenças. Observa-se que os corpos d’água em 2010 que apresentaram pontos de monitoramento com valores médios do IQA nas classes “péssima” e “ruim”, se encontram em corpos d’água localizados próximos às capitais ou próximos a cidades de médio e grande porte (ANA, 2012).

Como descrito por Rodrigues (2009), entender a dinâmica e a disponibilidade dos elementos-traço, bem como sua condição natural, constitui um desafio grande para muitos estudos envolvendo as questões ambientais, principalmente diante da



constatação de que os impactos das atividades humanas sobre esses sistemas têm se intensificado nos últimos anos. As referências de Tarley e Arruda (2003) apud Rodrigues, 2009, citam que a industrialização é apontada como uma das maiores dispersoras de elementos tóxicos, fato que, aliada ao crescimento populacional rápido e a algumas atividades agrícolas, aumentaram o nível de poluição em diversos ambientes naturais (Santoyo et al., 2004 apud Rodrigues 2009), acarretando profundas transformações no meio ambiente.

Relacionando-se às exigências ambientais citadas à modificação do uso do solo, bem como à conseqüente alteração dos recursos ambientais, na etapa de licenciamento ambiental de uma nova mina a céu aberto há a obrigatoriedade de cumprimento de um roteiro mínimo de avaliações ambientais estabelecido pelos órgãos ambientais nos termos de referência, voltadas para a qualidade do solo, do ar, da vegetação, da fauna, da flora e das águas naturais. A elaboração de análise integrada que descreva os impactos ambientais possíveis e previstos constitui ferramenta fundamental para o entendimento sinérgico das interferências, como subsídio à definição de ações para mitigação e ajustes desses impactos. Ressalte-se que, no processo de licenciamento, a opinião da sociedade, por meio de audiências públicas, define o posicionamento da coletividade quanto à instalação do empreendimento. Neste contexto, dentre os temas abordados no licenciamento ambiental, observa-se que o tema recursos hídricos apresenta-se como um dos mais importantes para a sociedade, não só do ponto de vista quali-quantitativo de uso, mas também como referência afetiva em relação aos cursos de água de sua região.

Assim, a definição de uma metodologia de avaliação da qualidade das águas, incluindo todas as etapas de desenvolvimento de uma mina a céu aberto, bem como a caracterização das condições naturalmente presentes, é de fundamental importância para subsidiar ações futuras de controle e ajustes no processo minerário e garantir a manutenção da qualidade das águas, como também para responder aos anseios da sociedade por uma condição de qualidade adequada ao uso e a manutenção de sua identidade afetiva.

### 1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Para a definição metodologia necessária para a avaliação da qualidade das águas nas diversas fase de uma mina a céu aberto seguiu os seguintes passos:

1. Avaliação das fases do empreendimento com base nos planos de produção de minério.
2. Definição das principais etapas envolvidas nas diferentes fases do empreendimento minerário.
3. Estabelecimentos dos atores envolvidos e suas respectivas responsabilidades dentro das respectivas fases do empreendimento.
4. Aplicação inicial do modelo de avaliação nas fases de planejamento e instalação.
5. Reavaliação da consistência dos resultados iniciais, bem como revisão das etapas, se necessário.

### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Como estrutura, esta tese se constitui de cinco capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta a introdução, justificativa da escolha do tema, os objetivos gerais e específicos, descrição do método da pesquisa a ser utilizado e o tipo de tratamento empregado nos dados obtidos.

O segundo capítulo descreve a base bibliográfica obtida quanto aos indicadores de qualidade da águas e históricos desse tema, dentro do contexto ambiental, suas relações com a legislação ambiental e a sua importância dentro da exploração mineral no Brasil.

O terceiro capítulo mostra a metodologia utilizada na pesquisa, considerando todos os atores envolvidos no processo de avaliação analítica de resultados de *background*, relacionando os indicadores de qualidade e classificação das águas à legislação ambiental vigente no Brasil e às normas e referências internacionalmente consagradas.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos com a aplicação da metodologia de análise da qualidade das águas para a área de influência do empreendimento, demonstrando a validação dos parâmetros selecionados para indicação da condição de *background* da área de estudo e índice de qualidade das águas.

O quinto capítulo mostra as conclusões obtidas com a definição da metodologia de avaliação da qualidade das águas em uma mina céu aberto, bem como sua importância e interface com o processo produtivo.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir será apresentado o embasamento teórico necessário para a definição de proposta metodológica de avaliação da qualidade das águas no entorno de uma mina a céu aberto.

### **2.1 QUALIDADE DAS ÁGUAS**

Para Meybeck et al., 1996, "A qualidade da água" é um termo usado para expressar a adequação da água de modo a possibilitar os usos diversos. Qualquer uso específico deverá atender a requisitos mínimos de características biológicas, físicas e químicas, como por exemplo, limites para as concentrações de substâncias tóxicas para o uso como fonte de água potável, ou restrições de faixas de temperatura e pH para suportar a vida das comunidades de invertebrados. Conseqüentemente, a qualidade da água pode ser definida por um conjunto de variáveis que limitam o seu uso. Embora muitos usos possuam alguns requisitos comuns para determinadas variáveis, cada utilização terá suas próprias exigências e influências sobre a qualidade e quantidade, além de demandas de diferentes usuários que em muitos casos podem inviabilizar a sua disponibilidade. É fato que as atividades de um usuário podem restringir as atividades de outros na mesma bacia. Assim, esforços para melhorar ou manter uma certa qualidade da água, muitas vezes são colocados como compromisso entre as exigências de qualidade e quantidade para usuários diferentes. Os ecossistemas naturais são reconhecidos como indicadores da alteração da qualidade das águas, visto que são extremamente sensíveis às alterações de qualidade (MEYBECK et al., 1996).

A composição das águas superficiais e subterrâneas é dependente de fatores naturais (geológicos, topográficos, meteorológico, hidrológico e biológico) na bacia de drenagem e varia de acordo com diferenças sazonais em volumes de escoamento, as condições meteorológicas e os níveis de água. Grandes variações naturais na qualidade da água podem, portanto, ser observadas em um único curso de água. A intervenção humana também tem efeitos significativos sobre a qualidade da água. Alguns destes

efeitos são o resultado de alterações hidrológicas, tais como a construção de barragens, drenagem de zonas húmidas e desvio de fluxo. Mais óbvia são as atividades poluentes, como a descarga de águas residuais domésticas, industriais, urbanos e outros no curso de água (se intencionais ou acidentais) e a difusão de produtos químicos em terrenos agrícolas na bacia de drenagem (MEYBECK et al.,1996).

A qualidade da água é afetada por uma ampla gama de influências naturais e humanas. A mais importante das influências naturais são geológicas, hidrológicas e climáticas, já que estas afetam a quantidade e a qualidade da água disponível. Sua influência é geralmente maior quando as quantidades de água disponíveis são limitadas, sendo necessário fazer o uso mínimo do recurso. Como exemplo cita-se a alta salinidade, que é um problema frequente em áreas áridas e costeiras. Se os recursos financeiros e técnicos estão disponíveis, a água do mar pode ser dessalinizada, mas em muitas circunstâncias, isso não é viável. Assim, embora a água possa estar disponível em quantidade suficiente, a sua qualidade inadequada limita a utilização. Embora o ecossistema natural esteja em harmonia com a qualidade da água natural, quaisquer alterações significativas na qualidade geralmente será prejudicial para o ecossistema (MEYBECK et al.,1996).

A qualidade da água pode ser descrita em termos de concentração e estado (dissolvido ou em suspensão) de algum ou de todo o material orgânico e inorgânico presente na água, juntamente com certas características físicas. Ela é determinada por medições *in situ* e pela análise de amostras no local ou em laboratório. Um dos objetivos de um programa de monitoramento é, portanto, reunir dados suficientes (por meio de amostragem e de análise regular ou intensivo) para avaliar as variações espaciais e / ou temporais na qualidade da água (MEYBECK et al.,1996).

A qualidade do ambiente aquático é uma questão mais ampla que pode ser descrito em função de:

- qualidade da água;
- a composição e o estado da vida biológica presente no corpo de água;
- a natureza do material particulado presente;
- a descrição física do corpo d'água (hidrologia, dimensões, natureza do fundo do lago ou leito do rio, etc.).

A avaliação completa da qualidade do ambiente aquático, por conseguinte, requer a análise da vida biológica, do material particulado e das características físicas da massa de água. Isto pode ser alcançado através de:

- análises químicas da água, partículas em suspensão e dos organismos aquáticos (como algas planctônicas e partes selecionadas de organismos como o músculo de peixe);
- testes biológicos, tais como testes de toxicidade e medições de atividades enzimáticas;
- descrições de organismos aquáticos, incluindo a sua ocorrência, densidade, biomassa, fisiologia e diversidade (à partir do qual, por exemplo, um índice biótico pode ser desenvolvido ou características microbiológicas determinadas);
- medidas físicas de temperatura da água, pH, condutividade, a penetração da luz, tamanho de partículas de material em suspensão e depositado, as dimensões da massa de água, a velocidade do fluxo, equilíbrio hidrológico, etc (MEYBECK et al.,1996).

## **2.2 CARACTERÍSTICA DE ÁGUAS DE SUPERFÍCIE**

### **2.2.1 Características Hidrológicas**

Meybeck et al.(1996) dividiu as águas continentais em água corrente, lagos, represas e águas subterrâneas. Segundo o autor, todas são interligadas pelo ciclo hidrológico, com muitos corpos de água intermediários, tanto naturais como artificiais. Zonas úmidas, como várzeas, mangues e aquíferos aluviais, têm características que são hidrológicamente intermediária entre as de rios, lagos e águas subterrâneas e tem importância biológica especial.

O fluxo do rio é unidirecional, muitas vezes com uma boa mistura lateral e vertical, mas pode variar muito com as condições meteorológicas e climáticas e padrão de drenagem. Águas de superfície, tais como lagos profundos e reservatórios, são caracterizadas por períodos de estratificação e mistura vertical alternada. Além disso, as correntes de água podem ser multi-direcionais e são muito mais lentas do que em rios. Além disso, o vento tem um efeito importante sobre o movimento das camadas superiores do lago e da água do reservatório. O tempo de residência da água em lagos é muitas vezes maior que seis meses e pode ser tanto quanto várias centenas de anos. Por outro lado, o tempo de residência em um reservatórios é geralmente inferior a um ano (MEYBECK et al.,1996).

### 2.2.2 Lagos e Reservatórios

Um fator importante que influencia a qualidade da água e especialmente das águas profundas, tais como lagos e reservatórios, é a estratificação. A estratificação ocorre quando a água no reservatório de um lago se comporta como dois corpos hídricos diferentes com densidades diferentes, um que flutua sobre o outro. É mais frequentemente causada por diferenças de temperatura, o que leva às diferenças na densidade da água, mas, ocasionalmente, por diferenças nas concentrações de soluto. A qualidade da água dos dois corpos de água também está sujeita a diferentes influências. Assim, por exemplo, a camada de superfície recebe mais luz solar, enquanto a camada inferior está fisicamente separada da atmosfera (que é uma fonte de gases tais como o oxigênio) e pode estar em contato com a decomposição de sedimentos que exercem uma redução de oxigênio. Como resultado dessas influências, é comum para a camada inferior ter uma concentração de oxigênio significativamente reduzida em comparação com a camada superior. Quando ocorrem condições anóxicas em sedimentos de fundo, vários componentes podem ter sua concentração aumentada nas águas intersticiais (por meio de dissolução ou redução). As substâncias produzidas desta forma incluem amônia, nitrato, fosfato, sulfureto, silicato, ferro, manganês entre outras (MEYBECK et al.,1996).

### 2.2.3 Rios

A compreensão do regime de descarga de um rio é extremamente importante para a interpretação das medições da qualidade da água, especialmente aquelas incluindo os sedimentos suspensos ou destinadas a medir o fluxo de sedimentos ou contaminantes. A descarga de um rio está relacionada com a natureza da sua bacia hidrográfica, em especial às influências geológicas, geográficas e climáticas (MEYBECK et al.,1996).

#### 2.2.3.1 Rios tropicais

O regime de um rio tropical é amplamente determinada pelo ciclo anual de estações secas e úmidas. Alguns regimes, e algumas das condições climáticas e geográficas que afetam regimes, são as seguintes:

- Rios Equatoriais - apenas com um pico de fluxo, resultantes da forte precipitação anual (1,750-2,500 mm) em áreas sem estação seca acentuada.
- Rios equatoriais - com dois picos de vazão, produzidos por precipitação, totalizando mais de 200 mm mensais e mais de 1.750 milímetros por ano. Há predomínio de floresta equatorial na área de captação.
- Rios na savana úmida tropical em planícies secas e molhadas sofrem efeitos sazonais de chuva. Nessas áreas, a estação seca persiste por pelo menos três meses.
- Em algumas áreas do planalto tropical úmido e seco, a duração da estação seca varia significativamente. As bacias hidrográficas em tais áreas são cobertas por bosques e savanas relativamente úmidos.
- Nas regiões relativamente mais secas do planalto tropical úmido, as bacias hidrográficas estão localizadas nas partes marginais das zonas de clima seco. A precipitação atmosférica raramente ultrapassa 500-700mm por ano, o que é típico de regiões semi-desérticas. A vegetação nas bacias desse rios é predominantemente savana seca.
- Em áreas onde a estação seca é prolongada, o regime dos rios não difere entre os tipos de vegetação e o fluxo tende a ser intermitente.
- Em regiões desérticas, onde a precipitação anual é inferior a 200mm, bacias hidrográficas são cobertas com areia, grama ou arbustos do deserto, e os rios são do tipo barranco. A rede de drenagem é pobre e até onde se base, há indícios que a área atingiu seu estágio de aridez.
- Muitos dos rios das regiões montanhosas tropicais têm bacias de drenagem de tamanho muito limitado.

Os grandes rios dos trópicos não se enquadram exclusivamente em nenhuma dessas categorias, porque suas bacias de drenagem se estendem por várias regiões de diferentes clima e vegetação. O regime do Rio Congo, no Zaire, por exemplo, é, em grande parte, uma combinação de regimes da região equatorial úmida e clima tropical serrano. A média de fluxo mensal é a mais alta em abril ( $76.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) e menor em julho ( $32.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). O Níger tem suas nascentes em uma zona molhada perto do oceano, mas, em seguida, flui em uma região semi-árida, onde ela está sujeita a perdas por evaporação. A bacia do rio Zambeze situa-se em grande parte em terras de clima tropical úmido e seco e em regiões semi-áridas, enquanto o Nilo apresenta o regime mais complexo de todos os rios africanos, que se estende ao longo de zonas climáticas muito diferentes (MEYBECK et al.,1996).

A Amazônia tem um regime de fluxo complexo por causa dos diferentes padrões de precipitação de seus principais afluentes. O fluxo começa em novembro, atinge o pico em março e em junho começa a reduzir, tendo pico de estiagem no final do mês de outubro (MEYBECK et al.,1996).

No contexto apresentado nessa tese, é relevante que sejam considerados conceitos essenciais a respeito do tema denominado *background* geoquímico, bem como suas relações com os conceitos ambientais que embasam os principais estudos que subsidiam os órgãos ambientais licenciadores na aprovação da viabilidade ambiental de um projeto de mineração.

Devido à complexidade dos estudos de *background* geoquímico, abaixo serão apresentadas as definições dos termos técnicos relacionados ao tema, embasadas nas principais referências internacionais.

### 2.3 CONCEITOS USADOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS

A seguir serão listados os principais conceitos do termo *background* geoquímico dentro da disciplina de qualidade das águas.

#### 2.3.1 *Background* Geoquímico

O termo *background geoquímico* tem sua origem na área de exploração mineral (Reimann e Garret, 2005). Contudo, na década de 80, com o desenvolvimento da área de ciências e engenharia ambiental, o termo *background* geoquímico teve sua definição derivada para aplicações relativas a essas áreas técnicas.

Especificamente, no caso de avaliação ambiental, o estudo de *background* geoquímico de uma área, visa distinguir as concentrações naturais de elementos e compostos químicos das concentrações influenciadas antropogenicamente (US EPA, 1995 apud Reimann e Garret, 2005).

Vale ressaltar que a investigação geoquímica de exploração mineral, baseada exclusivamente na amostragem sistemática, tem como principal objetivo detectar áreas ricas em certos elementos traços. Porém, a utilização desses dados para o levantamento geoquímico de *background* com fins ambientais, deve ser feita com certa reserva (Crock et al., 1992; Darnley, 1997 apud Reimann e Garret, 2005). A seguir são apresentados os conceitos utilizados em estudos, tanto na área mineral quanto ambiental.



### 2.3.1.1 Exploração mineral

O termo *background* geoquímico é originário da exploração geoquímica. Neste sentido, tem sido definido como “a abundância normal de um elemento em áreas não alteradas”. Este conceito foi introduzido para diferenciar as concentrações normais dos elementos das concentrações anômalas (HAWKES e WEBB, 1962).

### 2.3.1.2 Concentração *background* de poluentes

Reimann e Garret (2005) relataram que se a atmosfera de uma determinada área é poluída por alguma substância de uma fonte local específica, então o nível de *background* de poluição é a concentração que existirá sem a fonte local estar presente. Medições podem então ser requeridas para detectar quanto de poluição é de responsabilidade da fonte local.

### 2.3.1.3 *Background* geoquímico natural

O termo *background* é usado para inferir sobre níveis de processos naturais não influenciados por atividades humanas (Reimann e Garret, 2005). *Background* geoquímico ou natural é uma medida para distinguir concentrações de elementos ou compostos naturais de concentrações influenciadas antropogenicamente (Matschullat et al., 2000a). O guia técnico *Metals Environmental Risk Assessment Guidance*, elaborado pela *International Council on Mining and Metals* em 2007, apresenta o termo *background* natural de um metal em um ambiente como sendo a fração do metal que se origina de processos geológicos, biogeoquímicos e de outros processos naturais.

### 2.3.2 Concentração Anômala

Por definição, uma anomalia é uma variação dos padrões geoquímicos do que é normal para uma determinada área. Uma anomalia geoquímica, mais especificamente, é uma divergência de um modelo geoquímico que é normal para uma dada área ou cenário geoquímico (HAWKES e WEBB, 1962).

### 2.3.3 Concentração *Baseline*

O termo *baseline* é, algumas vezes, utilizado em equivalência a *background* ou então como “ambiente *background*”, que é considerado em um contexto de medição de níveis “agora”, permitindo que mudanças no futuro possam ser quantificadas (Reimann e Garret, 2005).

### 2.3.4 Plano de Monitoramento Ambiental

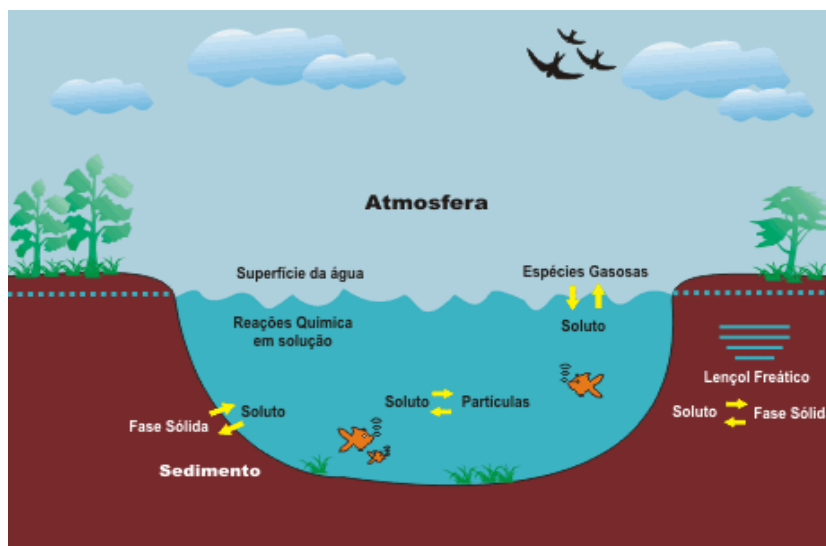
O plano de monitoramento ambiental é feito para assegurar o controle dos aspectos ambientais das atividades que causam impactos significativos no meio ambiente. O monitoramento ambiental consiste na avaliação periódica, por meio de medição ou checagem de um parâmetro de controle ambiental local, visando a conformidade com os requisitos da legislação ambiental, caracterização de uma determinada área, determinação de valores de *background* geoquímico dentre outros objetivos.

Segundo a Resolução CONAMA N.º 357/2005, parâmetros de qualidade da água são substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água. Os parâmetros, elementos químicos ou compostos, a serem considerados em um plano de monitoramento, variam de acordo com os objetivos que se quer alcançar com a execução do plano, com a composição química natural da área e com o empreendimento nela localizado.

### 2.3.5 Hidroquímica de Metais e Metalóides

A Geoquímica Ambiental está relacionada a reações e processos químicos que afetam a distribuição e circulação de espécies químicas (inorgânicas) em diferentes ambientes naturais (Figura 1). Estes ambientes podem ser corpos de água estacionários como lagos e barragens, ou corpos de água que circulam como rios e correntes marinhas, ou águas que percolam em um perfil de solo. As espécies químicas poluentes ou não, reagem com outras espécies químicas inorgânicas ou orgânicas assim como minerais e outras fases sólidas (minerais, partículas orgânicas etc...) presentes nesses diversos ambientes naturais. O acesso das constantes condicionais de equilíbrio ( $K$ ), assim como a cinética (tempo para atingir equilíbrio) envolvida nestas reações, é fator fundamental para a

realização de uma amostragem desses corpos de água com objetivo de monitoramento ou estudo ambiental (VASCONCELOS et al.,2009).



**Figura 1 - Reações geoquímicas nos diversos compartimentos ambientais**

**Fonte: Vasconcelos et al. (2009)**

### 2.3.6 Princípios e Processos de Controle da Água Natural

Hem (1985) avaliou os as reações químicas em meio aquoso. Segundo o autor, os Solutos contidos na água são produtos de uma série de reações químicas anteriores que causaram a dissolução de materiais, com alteração prévia dos principais componentes, ou eliminação destes da solução por precipitação ou outros processos. Os processos químicos são influenciados fortemente por atividades biológicas em alguns ambientes e por processos de natureza física. Compreender estes processos, e ser capaz de fazer declarações quantitativas sobre eles, requer a aplicação de análise teórica e o desenvolvimento de modelos experimentais. Estas hipóteses são por vezes referidas como "modelos conceituais". Princípios termodinâmicos, aplicados às transferências de energia química, formam uma base para avaliar quantitativamente a viabilidade de vários processos químicos em sistemas de água naturais, para prever a direção em que as reações químicas podem ir, e em muitos casos, para prever as concentrações dissolvidas reais dos produtos que devem estar presentes na água.

### 2.3.7 Reações Químicas

As reações químicas de cada elemento nesse processo, envolvem mudanças no arranjo e associação de átomos e moléculas, bem como interações entre os elétrons que cercam os núcleos atômicos. A química das águas naturais, está relacionada principalmente com as reações das soluções aquosas diluídas, embora algumas águas naturais tenham concentrações elevadas de soluto. Os sistemas de reação de interesse são geralmente heterogêneos, isto é, elas envolvem uma fase líquida e uma sólida ou uma fase gasosa, ou todos as três (HEM, 1985).

Muitos tipos de reações químicas são consideradas importantes para estabelecer e manter a composição natural da água. Os conceitos que apropriados para a avaliação desses processos diferem um pouco, dependendo da natureza das reações envolvidas.

Uma reação irreversível é aquela em que os reagentes são totalmente convertidos em produtos e a afinidade química da reação pode não ser alcançada enquanto alguma quantidade de reagente químico permanece. Neste sentido, um processo reversível é aquele em que reagentes e produtos podem estar presentes quando a afinidade química da reação é zero, ou aproximadamente zero, para esta reação direta ou inversa. Isto pressupõe que para alcançar e sustentar esta condição, as reações direta e inversa ocorrem simultaneamente, pelo menos em uma micro-escala, e em taxas comparáveis quando as afinidades químicas das reações são pequenas (VASCONCELOS et al., 2009).

As reações químicas de interesse no sistema aquático natural podem ser consideradas como três tipos gerais: (1) processos imediatamente reversíveis, (2) processos em que a reversibilidade é impedida e (3) processos que são irreversíveis termodinamicamente. (HEM, 1985).

### 2.3.8 Ataque e Dissolução de Sais

Szikszy, 1993, descreve os princípios de dissolução de sais no ambiente aquático e mostra que o contato entre água e rocha causa a solubilização dos componentes como também a precipitação dos mesmos nas cavidades da rocha. Os processos principais são a dissolução e a hidrólise. O ataque da água aumenta com a presença de ácidos orgânicos e inorgânicos e também com o aumento da temperatura. As dissoluções e precipitações são controladas principalmente pelo pH e Eh.

Aumentando a temperatura, aumenta a solubilidade destes sais. A solubilidade de  $\text{CaCO}_3$  em água pura diminui um pouco com o aumento da temperatura, que é um comportamento oposto ao da maioria dos sais. A solubilidade dos carbonatos é mais influenciada pela variação da solubilidade do  $\text{CO}_2$ .

Os fenômenos de oxidação são importantes nas zonas atravessadas pelas águas superficiais. Ocorrem na zona de infiltração, entre o solo e a superfície do nível estático. Ocorre também na zona saturada, embora menos intensivamente.

A oxidação é importante no caso dos sulfetos como a pirita, resultando em óxido de ferro e ácido sulfúrico, que pode atacar os calcários com a formação de sulfato. Na ausência de carbonatos, forma-se alumina com argila. Ainda, a oxidação é importante na magnetita produzindo óxido férrico e íons ferrosos. A redução também é importante no caso das águas subterrâneas, especialmente em contato com jazidas de petróleo. A matéria orgânica cria ambiente redutor.

A estabilidade de um elemento num estado de oxidação é função de mudança de energia devido à subtração ou adição de elétrons. Essa mudança de energia pode ser medida pelo potencial de óxido-redução ou potencial de redox, Eh, já citado anteriormente.

### 2.3.9 Dissolução e Ataque no Solo

A dissolução começa desde a superfície, mas é mais importante na zona de infiltração. O que caracteriza o solo é a presença da matéria orgânica na parte superior. A água tem um papel importante porque ela é o veículo das dissoluções por hidratação e hidrólise. No solo, precisa-se considerar um movimento descendente e ascendente. Movimento descendente durante o período da chuva e movimento ascendente durante o período da seca. Na parte superior do solo, a água pode evaporar e mais profundamente ela é absorvida pelas raízes. Portanto, predominância da direção de um movimento sobre o outro depende da estação e do clima. Em climas temperados, o movimento descendente predomina no inverno e o ascendente no verão. Em climas tropicais, com poucas chuvas, o movimento descendente é ocasional e o ascendente é a regra. Em regiões tropicais, com chuva o movimento descendente predomina sobre o ascendente. Em regiões equatoriais, o movimento descendente predomina sobre o ascendente. Quando o movimento ascendente predomina, as substâncias dissolvidas sobem e nesse caso há a possibilidade das precipitações no solo. Quando o movimento descendente predomina,

ocorre a lixiviação dos terrenos. Esses são fatores que influem na formação dos solos de diferentes tipos e os fatores principais da sazonalidade climática da composição química das águas (SZIKSZAY, 1993).

#### 1) Matéria viva e morta no solo

São as raízes dos vegetais, animais, organismos inferiores o peso de raízes é muito grande, por exemplo de raízes de trigo =  $152,5 \text{ g/m}^2$  (GAROLA,1903; SCHOELLER, 1962 apud SZIKSZAY, 1993).

Nematoda, miriápoda, insetos, vermes pesam num solo fertilizado  $79 \text{ g/m}^2$ , de onde  $1.65 \text{ g/m}^2$  é de N e em solo não fertilizado  $36,8 \text{ g/m}^2$ , representando  $1.0 \text{ g/m}^2$  de N.

Os organismos inferiores têm um papel importante no solo, não por seu peso mas pelas reações químicas que produzem. São mais abundantes, em 10 - 20cm de profundidade do solo, as bactérias. A importância dos organismos no solo favorece a penetração do  $\text{O}_2$ , movimentando a terra, portanto a oxidação ou combustão e a penetração da água. São essencialmente produtores de  $\text{CO}_2$  e destruidores da matéria orgânica.

A matéria morta, no solo, é uma parte importante da pedologia e da geoquímica dos solos. A matéria morta fornece o húmus. Depende da quantidade da matéria viva no solo, cresce com a temperatura e com a quantidade de água disponível, portanto depende do clima (SCHOELLER, 1962 apud SZIKSZAY, 1993).

#### 2) Nitrogênio na zona não saturada

O nitrogênio no solo tem duas origens: proveniente do ar, com ou sem chuva, e da matéria orgânica viva ou morta. O nitrogênio trazido pelo ar e a chuva tem uma concentração de 79 - 81% e no ar é 78,03%, sendo portanto quase igual. A chuva traz 0,1 - 0,2 até  $4 \text{ mg/L}$  e pode chegar até  $28 \text{ mg/L}$  de  $\text{NH}_3$ , 0,03 -  $12 \text{ mg/L}$  de  $\text{NO}^{3-}$  e  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ mg/L}$  de  $\text{NO}^{2-}$ . O nitrogênio fixado na matéria orgânica viva passará para o húmus, que será a fonte de  $\text{NH}^{4+}$ ,  $\text{NO}^{2-}$ ,  $\text{NO}^{3-}$  e  $\text{N}_2$  (SCHOELLER, 1962 apud SZIKSZAY, 1993).

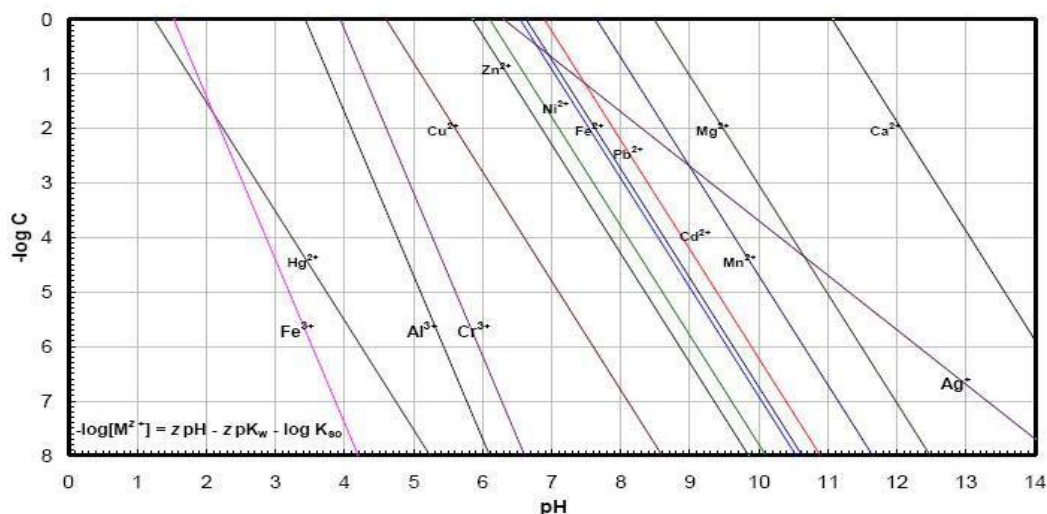
### 3) Ácidos orgânicos e CO<sub>2</sub>

Os ácidos orgânicos são ácidos resultantes da decomposição da matéria orgânica pelas bactérias. Ex: ácidos butírico, fórmico, acético, propiônico, oxálico, fumárico, succínico, cítrico, tânico, láctico e valeriano. São instáveis, não persistem na água, mas ficam suficientemente no solo para atacar os carbonatos.

A origem principal do CO<sub>2</sub>, no solo, é a respiração dos vegetais (sistema radicular), amonificação, nitrificação, oxidação, etc.

Existe uma variação da produção de CO<sub>2</sub> com a cobertura vegetal, profundidade (máxima até 20 - 50cm) e diminui a partir de 50cm; latitude (função de clima, seco ou úmido com ou sem vegetação) e altitude (também clima), exemplo (SCHOELLER, 1962 apud SZIKSZAY, 1993).

A Figura 2 apresenta a solubilidade dos óxidos e hidróxidos metálicos em função do pH, ou seja, a concentração de íon-metal livre em equilíbrio com óxidos ou hidróxidos sólidos. A ocorrência do complexo hidróxido-metalico deve ser considerada na evolução da solubilidade completa dos metais (STUMM e MORGAN, 1996 apud GOLDBER, 2010).



**Figura 2 - Diagrama de apresentação da solubilidade - hidróxidos e óxidos metálicos**

**Fonte: Stumm e Morgan apud Golder (2010)**

Portanto, em condições normais de pH (6 a 8), sob pressão atmosférica normal, os metais zinco, níquel, chumbo e cádmio poderiam apresentar concentrações acima dos limites legais estabelecidos pela Resolução CONAMA N°357/05. Os metais ferro

ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e ( $\text{Mn}^{2+}$ ) são espécies estáveis somente em ambientes redutores ( $E_h < 100\text{mV}$ ). Observa-se que em uma solução em condições normais de temperatura, em ambiente aberto sob pressão atmosférica e em equilíbrio com fases precipitadas de óxidos e hidróxidos, as concentrações de cobre, cromo e alumínio, na faixa de pH 6, possuem concentrações abaixo do limite máximo permitido pela Resolução CONAMA N°357/05. Pela inclinação das retas, a mesma afirmação se aplica para o mercúrio e ferro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (GOLDER, 2010).

### 2.3.10 Reações de Interfaces

As superfícies de contato entre a água e os meios gasoso e sólido representam locais de relevada importância nos processos físico-químicos. Hem (1985), descreveu as principais relações de interface de um meio aquoso.

#### 2.3.10.1 Interface gás-líquido

A superfície de um corpo de água em contato com a atmosfera em condições padrão de temperatura e pressão é rigidamente mantida por forças intermoleculares. As moléculas de água, no entanto, são capazes de passar através desta superfície para o ar, e as moléculas de gás a partir do ar pode difundir-se na água. Ambos os processos tendem a produzir a saturação perto da interface mútua. As taxas de absorção de gases por água ou taxas de evaporação de água são funções das características do sistema. A taxa de transporte pode ser lento se depender exclusivamente da difusão molecular. Na maioria dos sistemas naturais, no entanto, o movimento do gás ou da fase líquida ajuda a transportar o material evaporado ou dissolvido para fora da fase de interface. O processo pelo qual os gases da atmosfera se dissolvem na água está diretamente associado a qualidade dessa água. O dissolvido oxigênio em drenagens ou lagos depende das características físico-químicas da área de interface, do mecanismo de transporte para fora da interface, temperatura e pressão. Alguns gases, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), reagem com a água, e a sua taxa de assimilação é afetada por subsequentes mudanças na forma como se apresenta no processo. O dióxido de carbono é um constituinte importante em diversos processos geoquímicos. Por exemplo, a reação de produção do  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (aq) produz outras espécies dissolvidas, mas a quantidade de dióxido de carbono



na forma não dissociada é exatamente a prevista pelo valor de  $K_h$ , que é conhecida para uma larga escala de temperaturas (HEM, 1985).

### 2.3.10.2 Interface sólido-líquido

Interações que ocorrem na interface entre as fases sólida e líquidas são muito importantes para a qualidade da água de um modo geral. Qualquer reação que envolva a dissolução ou a precipitação de um sólido ocorre nessa interface. A superfície sólida exposta é coberta com uma camada fortemente ligada de moléculas de água, e também ao entorno ou dentro desta camada estão íons ou moléculas do soluto, ligadas por forças de atração eletrostática de vários tipos. As espécies de soluto na interface podem ser removidas ou substituídas por outros solutos, sem afetar significativamente as propriedades da superfície sólida. Estes processos são geralmente chamados de adsorção, o que implica que ocorre na interface sólido-água, ou por vezes, de maneira geral, "sorção", que é um termo mais evasivo que pode incluir outros processos.

Processos de sorção (sorção = adsorção + absorção + precipitação) e de trocas iônicas são importantes em diversos compartimentos ambientais, tais como: atmosfera, águas superficiais ou subterrâneas, solo e em plantas de tratamento de efluentes ou de esgoto. Por exemplo, o processo de sorção de cobre ou de outros metais traços em solo tem grande importância não somente na avaliação do transporte de metais traço em subsuperfície, mas também na amostragem destes elementos tanto em águas superficiais como subterrâneas. A cinética (tempo para a reação atingir equilíbrio) deste tipo de reação (processo de sorção) geralmente é rápida; existe uma probabilidade grande de que as amostras de metais dissolvidos, que não são filtradas *in situ*, tenham seus resultados alterados, principalmente para amostras de água que se encontram em pH entre 6 e 8. Dessa forma, amostras com turbidez moderada a elevada ( $Turb > 10NTU$ ) podem apresentar alteração significativa em seu valor analítico devido à contribuição dessas partículas e após a preservação da amostra com ácido forte (ácido nítrico –  $HNO_3$ ). Assim, recomenda-se que para estudos de *background* geoquímico trabalhe-se com parâmetros dissolvidos ou com parâmetros totais quando a turbidez for menor que 10NTU (VASCONCELOS et al., 2009).

As trocas iônicas são processos físico-químicos que ocorrem na interface sólidos/solução, de forma que íons em solução podem ser transferidos ou “trocados” por íons da superfície dos sólidos. Esse processo, assim como o de sorção, tem importância

ambiental relevante pelas mesmas razões mencionadas anteriormente e podem também interferir nos resultados de amostragem de água. Assim como o processo de sorção, o de troca iônica também pode ter uma cinética de reação bastante rápida (minutos a horas), portanto, para se obter resultado confiável de espécies dissolvidas é recomendável que a operação de filtragem seja feita em campo e não em laboratório minutos ou horas depois da coleta da amostra (LANGMUIR, 1997 apud VASCONCELOS et al., 2009).

### 2.3.11 Características dos Metais e Metalóide em Águas

As concentrações dos elementos químicos na água, no solo e sedimentos envolvem além de suas interações, conhecimentos de geoquímica e até especiação química. As técnicas atuais para determinar a especiação de metais, tanto nas atividades de coleta quanto nas análises laboratoriais, evoluiu consideravelmente dentro da geoquímica ambiental (BEDNAR, et al., 2002).

Os principais metais e metalóides que merecem atenção quando se pretende avaliar impactos ambientais sobre a qualidade de águas podem ser resumidos em: ferro (Fe), manganês (Mn), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cobre (Cu), cromo (Cr), zinco (Zn), alumínio (Al), cádmio (Cd), níquel (Ni), e cobalto (Co) e do metalóide arsênio (As) (HEM, 1985).

#### 2.3.11.1 Ferro (Fe)

Embora o ferro seja o segundo elemento metálico mais abundante na crosta externa da Terra, as concentrações presentes na água geralmente são pequenas. O comportamento químico de ferro e a sua solubilidade em água depende fortemente da intensidade de oxidação no sistema em que ocorre; O pH é uma influência bem forte. A química do ferro em sistemas aquosos foi estudado extensivamente, e o seu contorno geral pode ser prontamente compreendido por aplicações de princípios químicos de equilíbrio. O ferro é um elemento essencial no metabolismo de plantas e animais. Se estiver presente na água em quantidades excessivas, no entanto, ele forma oxi-hidróxidos que precipitam com coloração vermelha, causando mancha e encardimentos em roupas e

utensílios domésticos. Por esta razão, as determinações de ferro são geralmente incluídos nas análises químicas da água (HEM, 1985).

#### 2.3.11.2 Manganês (Mn)

Apesar de ser um dos elementos metálicos mais abundantes na crosta terrestre, o manganês não é um constituinte essencial dos silicatos mais comuns, mas pode substituir o ferro, magnésio, cálcio nas estruturas dos silicatos. A química do manganês semelhante a de ferro em que ambos os metais participam de processos redox em intemperismo químico nos ambientes naturais. O manganês é um elemento essencial no metabolismo da planta, e é de se esperar que a circulação orgânica de manganês influencie a sua ocorrência em águas naturais (HEM, 1985).

#### 2.3.11.3 Chumbo (Pb)

A palavra latina para o chumbo "plumbum," é preservada nos termos em inglês relacionados a transporte de água ("encanamento", etc.) e sugeri a longa história do uso de chumbo para tubulações de água. O chumbo é comparável em abundância ao cobalto e é bastante dispersos em rochas sedimentares. A sua mobilidade natural é baixa, no entanto, devido à baixa solubilidade dos carbonatos hidróxido chumbo (Hem e Durum, 1973 apud Hem 1985; Hem, 1976b, apud Hem 1985; Bilinski e Schindler, 1982, apud Hem 1985) e fosfato (Nriagu, 1974, apud Hem 1985). A adsorção de chumbo em superfícies orgânicas e inorgânicas de sedimentos (Hem, 1976<sup>a</sup> apud Hem 1985) e co-precipitação de chumbo com óxido de manganês (Hem, 1980, apud Hem 1985) também tendem a manter baixos os níveis de concentração em águas superficiais e subterrâneas. (Hem, 1985). Algumas das utilizações de chumbo por seres humanos tendem a dispersar o elemento amplamente através do ambiente. Na década de 1920, a adição de tetraetilo de chumbo foi encontrado para promover uma combustão mais eficiente de gasolina utilizada em motores de automóveis. A mistura "Chumbo" gasolina permitia uma maior compressão da mistura ar-combustível, que por sua vez aumentava a potência de saída. O teor de chumbo do combustível é emitido como um aerossol de gases de escape, aumentando as quantidades dispersas em função do aumento do número de veículos em uso. As principais formas inorgânicas dissolvidas de chumbo são o íon livre  $Pb^{2+}$ , complexos de hidróxido, e, provavelmente, os pares de carbonato e

de íons sulfato. A importância de complexos orgânicos é incerta, mas podem constituir uma parte significativa do chumbo dissolvido em algumas águas.

Cálculos de solubilidade (Hem e Durum, 1973, apud Hem, 1985) mostram que o equilíbrio envolvendo carbonato básico de chumbo pode manter a concentração de chumbo dissolvido em torno de  $50\mu\text{g/L}$  na água que apresenta  $61\text{mg/L HCO}_3$  e um pH entre 7,5 e 8,5. Águas de alcalinidade baixa e pH baixo podem reter concentrações maiores. O chumbo é um elemento presente na indústria de um modo geral, pois compõem uma gama de produtos como tintas, vernizes, combustíveis, cosméticos, entre outros. Por estar presente em muitos produtos usados no dia a dia é comum que haja algum tipo de contaminação do homem pela ingestão de alimentos e água contaminada com esse elemento (HEM 1985).

#### 2.3.11.4 Mercúrio (Hg)

No final dos anos 1960 e início dos anos 1970, a importância potencial de mercúrio como um poluente ambiental passou a ser reconhecida e com isso foram tomadas medidas para reduzir os usos permitidos para lançamento em águas naturais e sedimentos.

O mercúrio é um metal em estado líquido a temperaturas normais, mas também é um pouco volátil a estas temperaturas. A forma estável na maior parte dos sistemas de água natural é o metal livre,  $\text{Hg (aq)}$  (Hem, 1970 apud Hem, 1985) que tem uma solubilidade de equilíbrio de  $25\ \mu\text{g / L}$ , num sistema fechado, sem fase gasosa ao longo de um intervalo de pH-Eh considerável. A quantidade que estaria presente em águas drenantes para a atmosfera é provável que seja muito mais baixa, devido à sua tendência a escapar como vapores. O mercúrio pode formar complexos de cloreto ou hidróxido dependendo do pH e da concentração total de cloreto.

Complexos orgânicos, tais como o metil-mercúrio,  $\text{HgCH}_3^+$ , e outras formas semelhantes, podem ser produzidas por bactérias geradoras de metano em contato com o mercúrio metálico no lago ou sedimento dos rios (Wood et al., 1968, apud Hem, 1985). Nesta forma, o elemento parece estar concentrado em espécies biológicas com sucessão ao longo das cadeias alimentares aquáticas, de modo que os peixes que vivem em ambientes levemente contaminadas podem conter mercúrio em sua composição. Vários usos culturais antigos de mercúrio e sua liberação para a atmosfera, principalmente na fundição e queima de combustíveis fósseis provavelmente elevou o

nível geral de background deste elemento no ambiente substancialmente acima do seu estado pré-industrial. Nota-se, no entanto, que mesmo que o elemento seja raro, a sua tendência natural para volatilizar tende a dispersá-lo amplamente (HEM 1985).

#### 2.3.11.5 Cobre (Cu)

A civilização industrial usa cobre extensivamente, e muitos desses usos resultam em sua dispersão no ambiente. O cobre é um elemento essencial para o metabolismo vegetal e animal. Pode ocorrer em crosta da Terra como o metal livre nativa,  $\text{Cu}^0$ , ou em  $\text{Cu}^+$  ou minerais  $\text{Cu}^{2+}$ . O Cobre pode ser dissolvida nas tubulações e encanamentos, especialmente pela água, cujo pH é inferior a 7.

Sais de cobre são, por vezes, propositadamente adicionado em pequenas quantidades para reservatórios de abastecimento de água para suprimir o crescimento de algas. Compostos orgânicos e inorgânicos de cobre têm sido utilizados extensivamente em pulverizações de pesticidas agrícolas. O elemento, portanto, tende a ser mais prontamente disponível para solução em águas superficiais e subterrâneas

Em geral, as concentrações de cobre em águas fluviais e terrestres estão perto ou abaixo do previsto. As concentrações inferiores são facilmente explicáveis como resultado de co-precipitação de óxidos ou adsorção nas superfícies minerais (HEM 1985).

#### 2.3.11.6 Cromo (Cr)

A abundância de cromo na crosta terrestre é semelhante ao de vanádio. Em minerais de rochosa no estado de oxidação predominante é  $\text{Cr}^{3+}$ . O cromo dissolvido, no entanto, pode estar presente como trivalente ou como ânions em que o estado de oxidação é  $\text{Cr}^{6+}$ . Em soluções alcalinas oxidantes, o ânion cromato pode ser estável, mas alguns cátions formam cromatos que têm baixa solubilidade. As rochas ígneas ultramáficas tem teores mais elevados de cromo do que outras rochas da crosta terrestre. A Cometa,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , se concentra em resíduos lateríticos que recobrem rochas ultramáficas e é altamente resistente às intempéries (HEM 1985).

### 2.3.11.7 Zinco (Zn)

O zinco tem aproximadamente a mesma abundância em rochas da crosta terrestre como o cobre ou níquel e é, portanto, bastante comum. No entanto, o zinco tem apenas um estado de oxidação significativa,  $Zn^{2+}$ , e tende a ser substancialmente mais solúvel na maior parte dos tipos de água natural do que os outros dois metais.

O zinco é essencial para o metabolismo vegetal e animal, mas a água não é uma fonte significativa do elemento propriamente dito. O zinco é amplamente utilizado na metalurgia, principalmente como um componente de latão e bronze, ou para a galvanização, em que é depositado como um revestimento para inibir a corrosão do aço. O zinco também é usado extensivamente como um pigmento branco (óxido de zinco) em tinta e borracha. Essas aplicações tendem a dispersar o elemento amplamente no meio ambiente, e sua disponibilidade na água foi bastante reforçada pela industrialização (HEM 1985).

### 2.3.11.8 Alumínio (Al)

Embora o alumínio seja o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ele raramente ocorre em solução em água natural, em concentrações maiores do que alguns décimos ou centésimas de miligrama por litro. As exceções são principalmente águas de pH muito baixo. Porque o alumínio é tão abundante e tão amplamente distribuído, a maioria das águas naturais têm ampla oportunidade para dissolvê-lo. As baixas concentrações comuns em águas de pH próximo de neutro deve, portanto, ser um resultado da química desse elemento.

O alumínio ocorre em quantidades substanciais em muitos silicatos minerais de rochas ígneas como o feldspato, os feldspatóides, as micas, e muitos anfíbolios. O íon de alumínio é pequeno o suficiente para caber em coordenação aproximadamente quatro vezes com o oxigênio e, portanto, pode substituir, em certo sentido, o silício em posições tetraédricas estruturais (HEM 1985).

#### 2.3.11.9 Cádmio (Cd)

O zinco e cádmio têm algumas semelhanças químicas, mas cádmio é muito menos abundante. Geralmente, o cádmio está presente em minérios de zinco e é recuperado de alguns minérios de cobre durante a fundição e refino.

O cádmio é usado para galvanoplastia e de pigmentos utilizados na pintura, tintas de impressão e plásticos. Ele também é usado extensivamente como um estabilizador para plástico PVC e em baterias elétricas e lâmpadas fluorescentes e vídeo. Muitas destas utilizações tende a tornar disponível esse elemento na água que entra em contacto com os resíduos enterrados.

Outro fator de importância é a tendência do cádmio de entrar na atmosfera através de vaporização a altas temperaturas. O cádmio pode, portanto, ser liberado para o ambiente em processos metalúrgicos e na combustão de combustíveis fósseis (HEM 1985).

#### 2.3.11.10 Níquel (Ni)

O níquel é um pouco mais abundante na crosta terrestre do que o cobalto. Os dois elementos têm algumas características semelhantes, pois ambos podem substituir ferro em minerais de rochas ígneas ferromagnesianas e tendem ser coprecipitados com óxidos de ferro ou especialmente, com os óxidos de manganês.

O níquel é um importante metal para a indústria. Ele é usado extensivamente em aço inoxidável e outras ligas resistentes à corrosão, e, em menor extensão para outros fins. Os minérios explorados comercialmente incluem sulfetos ferrosos nos quais o níquel é substituído por parte do ferro. Devido à sua vasta utilização, os resíduos contendo níquel podem ter contribuído para a sua presença no meio ambiente em quantidades significativas (HEM 1985).

#### 2.3.11.11 Cobalto (Co)

A concentração de cobalto na crosta terrestre, é semelhante ao de lítio. O elemento é essencial para a nutrição vegetal e animal, especialmente para animais ruminantes.

Íons de cobalto pode substituir parte do ferro em minerais da rochas ferromagnesianas e, como ferro, cobalto pode ocorrer em 2+ ou 3+ estados de oxidação. A precipitação ou adsorção de cobalto por óxidos de ferro e de manganês parece ser um fator importante

no controle das quantidades que podem ocorrer em águas naturais. As concentrações de cobalto comumente presentes na água dos rios são muito pequenas, e a maioria das compilações de dados incluem muitas notações de "abaixo do limite de detecção para este elemento (HEM 1985).

#### 2.3.11.12 Arsênio (As)

Pequenas quantidades de arsênio podem ser tóxicas para os seres humanos, sendo considerado uma impureza altamente indesejável no abastecimento de água. Os aspectos biológicos e bioquímicos do arsênio são potencialmente significativos. O elemento é amplamente envolvido em processos bioquímicos. A importância dos processos bioquímicos e das reações químicas em meio aquoso para o arsênio ainda está sendo estudada. O Arsênio tem sido usado como um componente de agrotóxicos e, portanto, pode entrar nos córregos ou águas subterrâneas através de eliminação de resíduos ou drenagem agrícola. Um fator importante para a circulação natural de arsênio, no entanto, é a volatilidade do elemento e alguns dos seus compostos.

A Tabela 1, a seguir, apresenta, em caráter informativo, as concentrações médias naturais/*background* de alguns metais pesados, comuns em rochas ígneas e litotipos sedimentares, obtidas por Hem (1985) e a sua comparação com as concentrações-limite preconizadas pela Resolução CONAMA N° 420/2009, como valores orientadores de investigação industrial para os solos e para águas subterrâneas (HEM 1985).



Tabela 1 - Concentração média natural de alguns metais, em rochas ígneas e sedimentares

Metal	Domínios Litológicos (HEM, 1985)		Resolução CONAMA 420/2009		
	Rochas Ígneas (ppm)	Rochas Sedimentares (ppm)		Limite de Investigação – Industrial (mg/kg)	Limite de Investigação (mg/L)
		Arenitos (areias)	Argilitos (argilas)	Solos	Águas Subterrâneas
Al	79.500	32.100	80.100	– <sup>(1)</sup>	3,500
Ag	0,15	0,12	0,27	100	0,050
As	1,80	1,00	9,00	150	0,010
Fe	42.200	18.600	38.800	– <sup>(1)</sup>	2,450
Mn	937	392	733	– <sup>(1)</sup>	0,400
Ba	595	193	250	750	0,700
Cd	0,19	0,02	0,18	20	0,005
Cr	198	120	423	400	0,050
Co	23	0,33	8,10	90	0,070
Cu	97	15	45	600	2,000
Hg	0,33	0,057	0,27	70	0,001
Mo	1,20	0,50	4,20	120	0,070
Ni	94	2,6	29	130	0,020
Pb	16	14	80	900	0,010
Sb	0,51	0,014	0,81	25	0,005
Se	0,05	0,52	0,60	<sup>(1)</sup>	0,010
V	149	20	101	1000	<sup>(1)</sup>
Zn	80	16	130	2.000	1,050

(1): L.I. industrial, a ser definido, pelo órgão gestor ambiental do Estado

Fonte: Hem (1985) apud Crono (2013)

Ainda, em relação à mobilidade do ferro, a modelagem geoquímica efetuada por DEUTSCH, W. (1997) apud Crono, 2013, demonstram que a sua mobilidade é significativamente influenciada pelas condições de pH e Eh do meio, conforme mostrado em diferentes simulações, cujos resultados são discriminados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Resultados de modelagem - mobilidade do Ferro sob pH e Eh diferenciados**

	Zona aquífera 1	Zona aquífera 2	Zona aquífera 3	Zona aquífera 4	Zona aquífera 5
Solução Ca-HCO <sub>3</sub> <sup>(a)</sup>	pH ≈ neutro	pH ácido	Neutralização c/ calcita	Pouco ácido, Sulfeto ausente	Pouco ácido, Sulfeto presente
Parâmetros	Meio oxidante <sup>(b)</sup>	Meio oxidante <sup>(c)</sup>	Meio oxidante <sup>(d)</sup>	Oxidante, de transição <sup>(e)</sup>	Meio redutor <sup>(f)</sup>
Fe(II)	8,00.10 <sup>-12</sup>	9,90.10 <sup>-3</sup>	7,80.10 <sup>-8</sup>	2,00.10 <sup>-3</sup>	1,40.10 <sup>-5</sup>
Fe(III)	8,50.10 <sup>-9</sup>	1,30.10 <sup>-7</sup>	1,20.10 <sup>-7</sup>	1,20.10 <sup>-7</sup>	2,20.10 <sup>-16</sup>
Fe(total)	8,51.10 <sup>-9</sup>	9,90.10 <sup>-3</sup>	1,98.10 <sup>-7</sup>	2,00.10 <sup>-3</sup>	1,40.10 <sup>-5</sup>
Ca	2,77.10 <sup>-3</sup>	3,80.10 <sup>-2</sup>	5,40.10 <sup>-2</sup>	5,20.10 <sup>-2</sup>	2,30.10 <sup>-2</sup>
HCO <sub>3</sub>	2,77.10 <sup>-3</sup>	4,00.10 <sup>-2</sup>	9,10.10 <sup>-3</sup>	9,20.10 <sup>-3</sup>	1,00.10 <sup>-2</sup>
SO <sub>4</sub>	1,50.10 <sup>-3</sup>	5,80.10 <sup>-3</sup>	4,60.10 <sup>-3</sup>	4,80.10 <sup>-3</sup>	1,70.10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> S	-	-	-	-	2,10.10 <sup>-3</sup>
pH	7,5	3,5	6,3	6,3	6,4
Eh (mV)	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>150</b>	<b>-150</b>

**Fonte: DEUTSCH, W. apud Crono (2013)**

(a): Ca<sup>2+</sup>:2,77.10<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup>: 0,5.10<sup>-3</sup>; Na<sup>+</sup>: 1.10<sup>-3</sup>; K<sup>+</sup>: 0,25.10<sup>-3</sup>; Cl<sup>-</sup>: 1.10<sup>-3</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:1,5.10<sup>-3</sup>; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>:2,77.10<sup>-3</sup>; em mol/kg.

(b): em equilíbrio c/ calcita(CaCO<sub>3</sub>) e ferrihidrita [Fe(OH)<sub>3</sub>];

(c): em equilíbrio c/ K-Jarosita[K Fe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (OH)<sub>6</sub>] e gipso (CaSO<sub>4</sub>);

(d): em equilíbrio c/ calcita(CaCO<sub>3</sub>), gipso (CaSO<sub>4</sub>) e ferrihidrita [Fe(OH)<sub>3</sub>]; Pressão P<sub>CO2</sub> = 0,1atm;

(e): em equilíbrio c/ calcita(CaCO<sub>3</sub>) e ferrihidrita [Fe(OH)<sub>3</sub>]; Pressão P<sub>CO2</sub> = 0,1atm;

(f): em equilíbrio c/ calcita(CaCO<sub>3</sub>), e sulfeto de Fe (FeS); Pressão P<sub>CO2</sub> = 0,1atm.

Reportando-se à Tabela 2, as condições de simulação referem-se a uma solução inicial de água do tipo bicarbonatada cálcica (Ca-HCO<sub>3</sub>) com quantidades mensuradas de solutos Mg, Na, K, Cl e SO<sub>4</sub>, em que outros constituintes estão presentes na água como o Silício (Si), mas que não oferecem efeitos significativos sobre a mobilidade do Ferro

(Fe), razão pela qual o elemento não foi incluído na modelagem geoquímica em apreço (CRONO, 2013).

Nas condições da zona aquífera 1, o pH inicialmente é simulado com o valor de 7,5 e o Eh, +400mV; a água encontra-se em equilíbrio com a ferrihidrita produzindo uma concentração total de Fe dissolvido de  $8,5 \cdot 10^{-9}$  moles/kg (0,0005mg/L) presente, primariamente, como Fe (III) em solução, estando também em equilíbrio com a calcita. Deste modo, sob condição oxidante e pH próximo do neutro, a baixa solubilidade da ferrihidrita limita a concentração de Fe para níveis muito baixos (CRONO, 2013).

#### 2.4 ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DOCES NO BRASIL

No Brasil, a legislação sobre a qualidade das águas foi elaborada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Dentre as principais resoluções, estão as relacionadas a classificação dos corpos hídricos e ao lançamento de efluentes líquidos.

A resolução N<sup>o</sup> 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências e considera alguns requisitos essenciais para manutenção da qualidade das águas superficiais:

- O enquadramento dos corpos de água deve estar baseado não necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade.
- A saúde e o bem-estar humano, bem como o equilíbrio ecológico aquático, não devem ser afetados pela deterioração da qualidade das águas.
- Há a necessidade de se criar instrumentos para avaliar a evolução da qualidade das águas, em relação às classes estabelecidas no enquadramento, de forma a facilitar a fixação e controle de metas visando atingir gradativamente os objetivos propostos.
- Considera-se relevante se reformular a classificação existente, para melhor distribuir os usos das águas, melhor especificar as condições e padrões de qualidade requeridos, sem prejuízo de posterior aperfeiçoamento.
- O controle da poluição esta diretamente relacionado com a proteção da saúde, garantia do meio ambiente ecologicamente equilibrado e a melhoria da

qualidade de vida, levando em conta os usos prioritários e classes de qualidade ambiental exigidos para um determinado corpo de água.

Dentre as principais definições e terminologias aplicadas a classificação da qualidade das águas, pode-se citar:

I - águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰;

II - águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰;

III - águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰;

VII - carga poluidora: quantidade de determinado poluente transportado ou lançado em um corpo de água receptor, expressa em unidade de massa por tempo;

IX - classe de qualidade: conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros;

X - classificação: qualificação das águas doces, salobras e salinas em função dos usos preponderantes (sistema de classes de qualidade) atuais e futuros;

XI - coliformes termotolerantes: bactérias gram-negativas, em forma de bacilos, oxidase-negativa, caracterizadas pela atividade da enzima  $\beta$ -galactosidase. Podem crescer em meios contendo agentes tenso-ativos e fermentar a lactose nas temperaturas de 44° - 45°C, com produção de ácido, gás e aldeído. Além de estarem presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos, ocorrem em solos, plantas ou outras matrizes ambientais que não tenham sido contaminados por material fecal;

XII - condição de qualidade: qualidade apresentada por um segmento de corpo d'água, num determinado momento, em termos dos usos possíveis com segurança adequada, frente às Classes de Qualidade;

XIII - condições de lançamento: condições e padrões de emissão adotados para o controle de lançamentos de efluentes no corpo receptor;

XIV - controle de qualidade da água: conjunto de medidas operacionais que visa avaliar a melhoria e a conservação da qualidade da água estabelecida para o corpo de água;

XV - corpo receptor: corpo hídrico superficial que recebe o lançamento de um efluente;

XIX - efetivação do enquadramento: alcance da meta final do enquadramento;

XX - enquadramento: estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo;

XXI - ensaios ecotoxicológicos: ensaios realizados para determinar o efeito deletério de agentes físicos ou químicos a diversos organismos aquáticos;

XXII - ensaios toxicológicos: ensaios realizados para determinar o efeito deletério de agentes físicos ou químicos a diversos organismos visando avaliar o potencial de risco a saúde humana;

XXIV - metas: e o desdobramento do objeto em realizações físicas e atividades de gestão, de acordo com unidades de medida e cronograma preestabelecidos, de caráter obrigatório;

XXV - monitoramento: medição ou verificação de parâmetros de qualidade e quantidade de água, que pode ser contínua ou periódica, utilizada para acompanhamento da condição e controle da qualidade do corpo de água;

XXVI - padrão: valor limite adotado como requisito normativo de um parâmetro de qualidade de água ou efluente;

XXVII - parâmetro de qualidade da água: substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água;

XXIX - programa para efetivação do enquadramento: conjunto de medidas ou ações progressivas e obrigatórias, necessárias ao atendimento das metas intermediárias e final de qualidade de água estabelecidas para o enquadramento do corpo hídrico;

O artigo 4º da resolução classifica às águas doces em quatro classes principais, estabelecendo os respectivos usos possíveis e a concentração máxima dos parâmetros a serem medidos para propiciar a classificação.

#### **I - classe especial: águas destinadas:**

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- b) a preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e
- c) a preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

#### **II - classe 1: águas que podem ser destinadas:**

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- b) a proteção das comunidades aquáticas;
- c) a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;
- d) a irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e
- e) a proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

**III - classe 2: águas que podem ser destinadas:**

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) a proteção das comunidades aquáticas;
- c) a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;
- d) a irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto e
- e) a aquicultura e a atividade de pesca.

**IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:**

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- b) a irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) a pesca amadora;
- d) a recreação de contato secundário e
- e) a dessedentação de animais.

**V - classe 4: águas que podem ser destinadas:**

- a) a navegação; e
- b) a harmonia paisagística.

## 2.5 CLIMA E METEOROLOGIA DA REGIÃO DE CARAJÁS

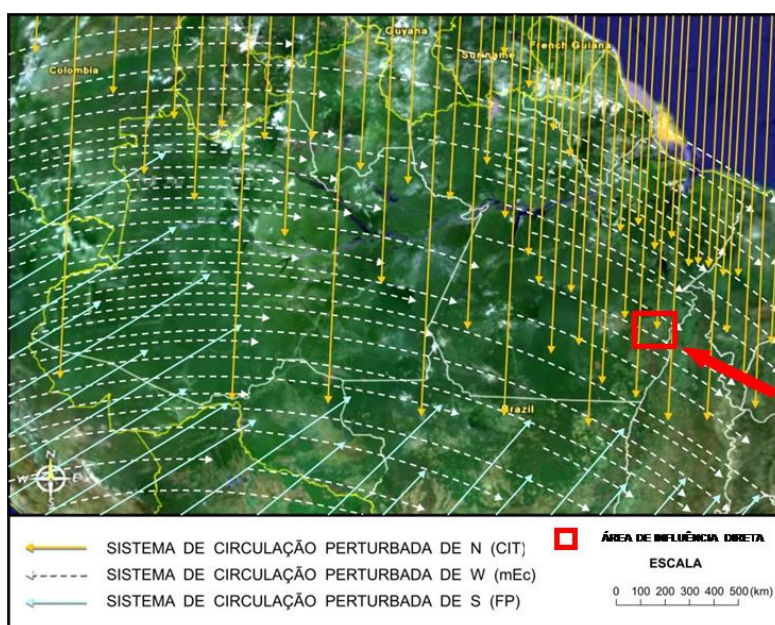
A caracterização climática e meteorológica é realizada num contexto regional e torna-se fundamental para embasar avaliações como a dispersão de particulados e gases para a atmosfera condicionada pelas características meteorológicas, dinâmica de processos erosivos condicionados pelos índices pluviométricos, comportamento hidrológico e da biota aquática no regime de sazonalidade dos cursos d'água, dentre outros. A caracterização do clima na área de influência do Complexo Minerador de Carajás foi baseada nos estudos de Nimer (1989) e nos estudos de Köppen que resultaram em uma classificação climática de escala planetária.

### 2.5.1 Sistema de Circulação Atmosférica

O clima e as condições meteorológicas da região de Carajás são fortemente condicionados pela localização geográfica (latitude) e relevo que, em ação conjunta com os grandes sistemas atmosféricos, controlam a distribuição pluviométrica, evaporação, temperatura, umidade do ar e regime de ventos.

Regionalmente é possível distinguir quatro sistemas de circulação atmosférica, definidas por Nimer (1989) para a região Norte e que influenciam em maior ou menor intensidade a região:

- Sistema de ventos de nordeste a leste, dos anticlones subtropicais do Atlântico Sul e dos Açores – tempo estável.
- Sistema de ventos de sudoeste, da massa de ar equatorial continental (MEC) ou linha de instabilidade tropical (IT) – tempo instável.
- Sistema de ventos de norte, da convergência intertropical (CIT) – tempo instável.
- Sistema de ventos de sul, do anticiclone ou frente polar (FP) – tempo instável.
- Os três últimos constituem correntes perturbadas, sendo, portanto, responsáveis por instabilidades e chuvas, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3 - Sistemas de circulação atmosférica perturbada**

Fonte: Adaptado de Nimer (1989)

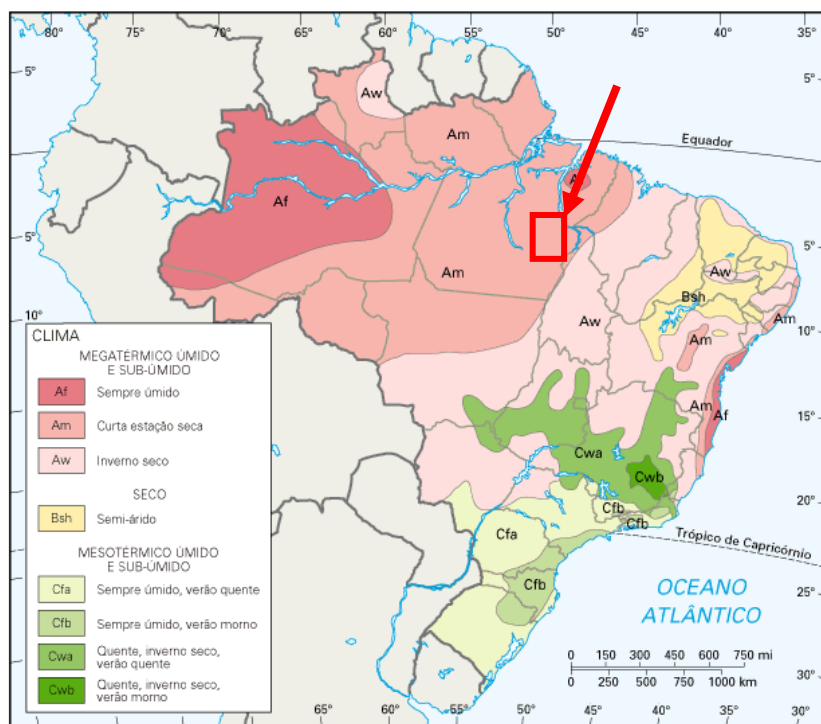
## 2.5.2 Classificação Climática

Pela classificação de Köppen, o clima da Amazônia é do tipo A, ou seja, tropical úmido com a temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (Figura 4). A classificação de Köppen apresenta ainda a seguinte subclassificação para o clima da região amazônica:

Af – clima tropical úmido, com precipitação média maior ou igual a 60 mm para o mês mais seco;

Am – clima tropical úmido de monção, com precipitação excessiva durante alguns meses;

Aw – clima tropical úmido, com inverno seco e precipitação média menor que 60 mm para o mês mais seco.



**Figura 4 - Localização da região de Carajás no mapa climático do Brasil**

**Fonte do mapa: Guia Internet Brasil (2009)**

As áreas de influência da região de Carajás estão incluídas na subclassificação Am. Na estação chuvosa, os volumes mais expressivos concentram-se no período de janeiro a março e a precipitação média mensal desse intervalo é da ordem de 240 mm. O período seco inclui os meses de junho, julho e agosto, cuja média mensal de precipitação é da ordem de 30 mm.



## 2.6 GEOLOGIA DO MINÉRIO DE FERRO DA MINA DE N5SUL

Os corpos de minério de ferro que ocorrem na mina de N5Sul pertencem ao Grupo Grão Pará de idade proterozóica incluindo as Formações Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra, bem como coberturas superficiais recentes, incluindo carapaças lateríticas (cangas), depósitos coluvionares e aluviões (Figura 5).

Entre as litologias presentes no minério, incluem-se as hematitas compactas, as hematitas friáveis, os jaspilitos, as máficas decompostas, as máficas semi-decompostas e as máficas sãs. A geometria do corpo de N5Sul possui a forma de um “J” com extensão lateral de mais de 1 Km, alongando-se por 3 Km e espessura de até 200 m.

O jaspilito consiste em uma sequência rítmica de bandas de sílica (quartzo e calcedônia), alternando com bandas ricas em ferro (hematitas e, em menor quantidade, magnetita) (Tolbert et al, 1971; Beisiegel et al. 1973). Macroscopicamente as mesobandas de sílica mostram espessuras de 2–30 mm e as de ferro de 2–40 mm. Ao microscópio, observam-se microbandas com espessuras inferiores a 1 mm. Este bandamento, que predomina amplamente, evidencia uma precipitação rítmica em condições tranquilas, refletindo as flutuações químicas das soluções mineralizantes. Estruturas sin-sedimentares podem ocorrer nos jaspilitos, formando pequenas calhas ou canais de erosão preenchidos por fragmentos de chert e/ou banda ferruginosa. Nota-se também a presença frequente de esferulitos (entre 0,01 e 0,05 mm) que mostram um núcleo arredondado de hematita, o qual é circundado por uma auréola de sílica microcristalina. Tais estruturas, descritas inicialmente por Meirelles (1986) e, posteriormente por Macambira e Silva (1995), são interpretadas como possíveis relictos de microfósseis (bactérias) capazes de precipitar a sílica biologicamente. Outra opção consiste em microconcreções de origem puramente química. Nos jaspilitos, destacam-se feições diagenéticas sin a pós-deposicionais, anteriores à litificação completa do sedimento, como fenômenos de slumping com desenvolvimento de brechas intraformacionais à partir de um material plástico, nódulos e vênulas de desidratação (quick-sand) sob efeito da pressão da sobrecarga sedimentar (Meirelles, 1986; Meirelles e Dardenne, 1993) a uma fase hidrotermal rica em CO<sub>2</sub> posterior à formação dos jaspilitos segundo os dados isotópicos do carbono e oxigênio obtidos por SIAL et al. (1999).

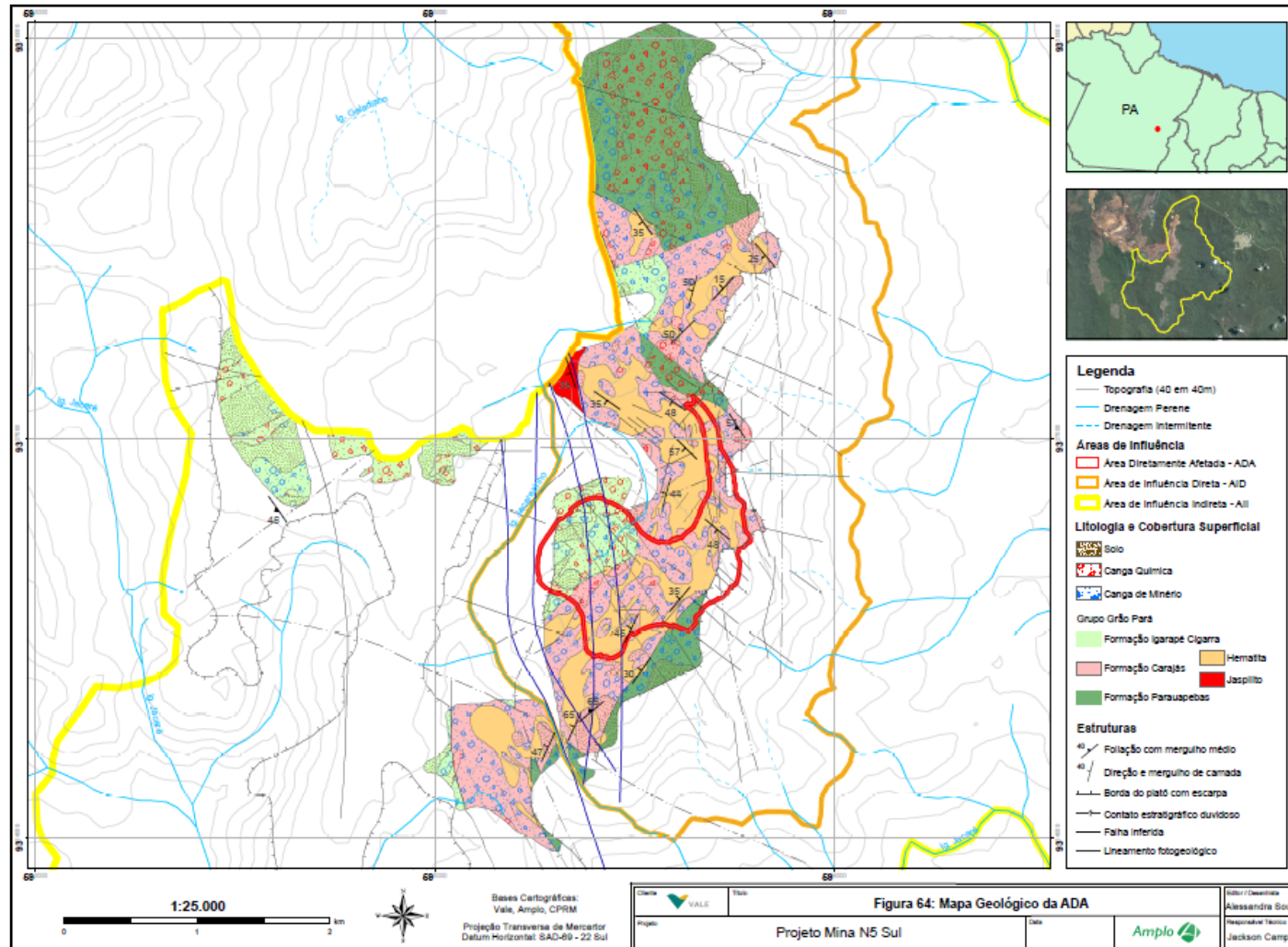


Figura 5 - Mapa Geológico da Mina de N5Sul em Carajás/PA

Fonte: Santos (2003) apud Amplo (2009)

## 2.7 ASPECTOS HIDROLÓGICOS DAS MINAS DE CARAJÁS

A Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia é constituída pela bacia hidrográfica do sistema Tocantins/Araguaia que inclui os afluentes do Rio Pará e Baía de Marajó (CNRH/ANA,2013).

O rio Parauapebas, principal afluente do rio Itacaiúnas, nasce na serra Arqueada após a junção do ribeirão do Caracol e do igarapé da Onça. Sempre flui na direção Sul-Norte e conta com os seguintes afluentes: pela margem esquerda, córrego da Goiaba, rio Sossego, igarapé do Taboca, igarapé Jacaré e igarapé Cigano ou Mombuca (também conhecido como Gelado); pela margem direita, os rios Plaquê e Verde, igarapé Ilha do Côco (que banha o rio Verde) e os rios Novo e Caracol (Ampló, 2009).

Especificamente à região da mina de N5Sul (Figura 6), os principais rios que drenam para o rio Parauapebas são o igarapé Geladinho, afluente da margem esquerda do Igarapé Gelado, e o igarapé Jacaré. As nascentes destes cursos de água estão situadas nas partes elevadas dos platôs da Serra dos Carajás. O igarapé Geladinho nasce nos platôs do corpo N5, seguindo na direção norte por cerca de 8km até desaguar no igarapé Gelado. O Igarapé Jacaré possui suas cabeceiras no corpo N4 até desaguar no rio Parauapebas, percorre um trecho de 20km. Sua bacia abrange uma área total de 113,9 quilômetros quadrados (Ampló, 2009).

Na sub-bacia do igarapé Jacaré, a drenagem mais expressiva corresponde ao igarapé Jacarezinho, afluente da margem esquerda do igarapé Jacaré. Este igarapé é formado pela confluência de duas drenagens, o igarapé Buriti, à direita, e o afluente esquerdo formado a partir do extravasor da lagoa intermitente de N5 Sul. O igarapé Buriti inicia-se na face sul da mina de N5E. Os dois afluentes que formam o igarapé Jacarezinho apresentam trechos iniciais próximos das cabeceiras secos ou com escoamento subsuperficial no período de estiagem. O igarapé Jacarezinho drena toda a porção oeste do platô que N5 Sul, antes de confluir com o igarapé Jacaré, enquanto que a porção leste do platô é drenada por igarapés sem nomes definidos que descarregam diretamente no igarapé Jacaré (Ampló, 2009).

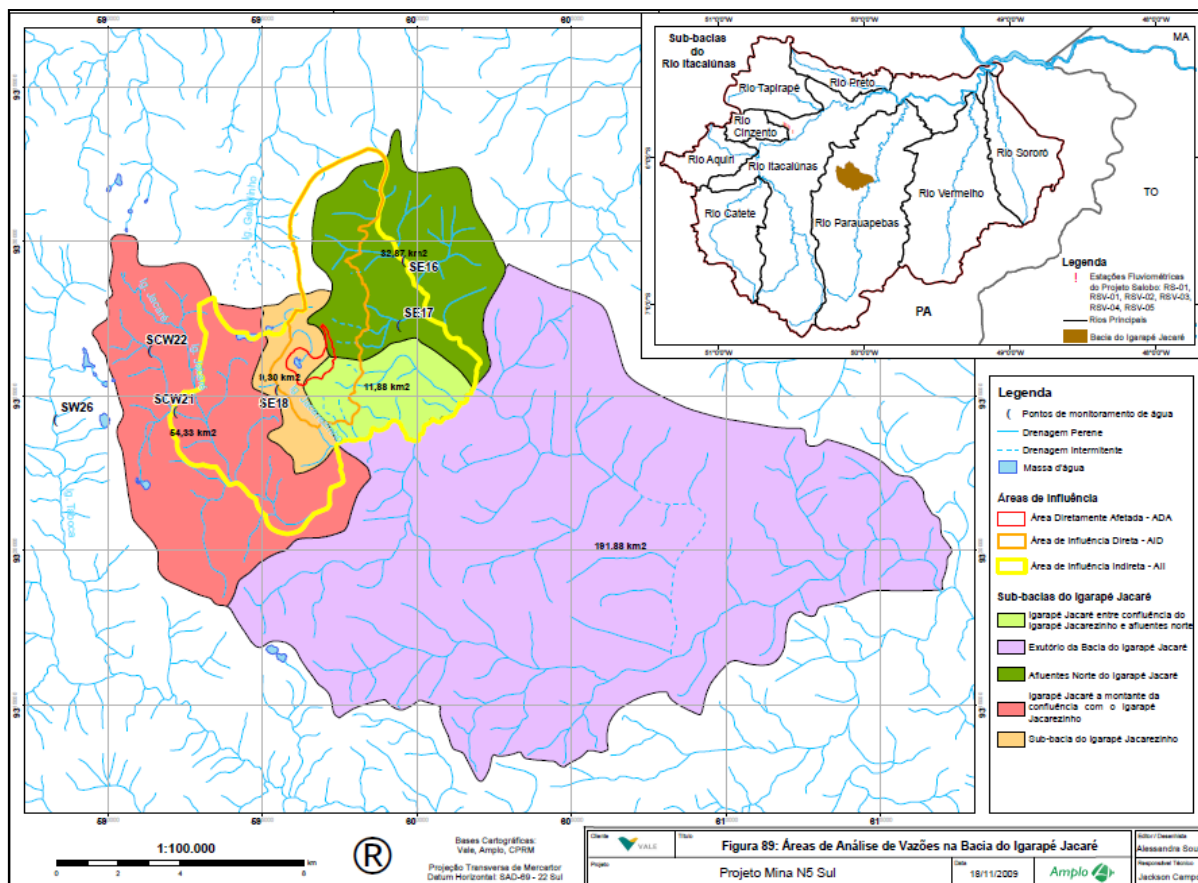


Figura 6 - Mapa hidrográfico da bacia do rio Itacaiúnas

Fonte: Amplo (2009)

## 2.8 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

O modelo hidrogeológico conceitual regional apresenta como principal unidade hidrogeológica, o aquífero da formação ferrífera. Informações levantadas através da perfuração de poços nas minas indicam que as hematitas macias representam as porções com melhores potenciais para extração de água. Essas hematitas macias apresentam uma porosidade granular decorrente da lixiviação de minerais, subordinadamente também podem apresentar uma porosidade secundária decorrente dos fraturamentos (MDGeo, 2006).

Já as hematitas duras das minas de ferro da Serra Norte, não possuem porosidade primária, são em geral muito compactas e pouco fraturadas não apresentando bom potencial para água. Possuem, portanto, baixa porosidade e baixa condutividade hidráulica. Comportamento hidrogeológico similar ocorre com o jaspilito. Existem

também alguns horizontes mais argilosos dentro da formação ferrífera que devem funcionar como aquífero (MDGeo, 2006).

Quanto às rochas máficas, as informações sobre suas características hidráulicas são mais escassas. Alguns dados de piezômetros próximos às cavas indicam uma condutividade hidráulica muito baixa para as rochas máficas alteradas, em geral sofrem pouca interferência do rebaixamento do nível d'água ocorrido na formação ferrífera. Por isso podem ser consideradas como aquícludes (MDGeo, 2006).

### 2.8.1 Sistema Hidrogeológico de Cobertura

Esse sistema é constituído pelas extensas e delgadas coberturas de cangas lateríticas, de natureza eluvial e coluvial e de idade cenozóica, que recobrem todos os platôs da Serra dos Carajás.

Esse sistema hidrogeológico, por sua natureza detrítica, constitui-se essencialmente em uma unidade aquífera de porosidade intersticial. No entanto, em determinadas porções pode apresentar comportamento de aquíferos ou aquícludes. Essas coberturas possuem uma função vital para o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos existentes, pois possibilitam a recarga para os mesmos, ao controlar a taxa de infiltração.

A canga de minério apresenta grande quantidade de vazios, tratando-se de um material muito permeável, constituído de fragmentos de hematitas de diversas dimensões cimentados por hidróxidos de ferro. Observa-se, na época chuvosa, que esse sistema sustenta um importante escoamento hipodérmico, persistente por todo esse período, o que atesta a sua grande capacidade de absorção de água. Ocorrem normalmente “in situ” sobre a formação ferrífera, mas pode avançar sobre esses limites, com pequeno transporte de fragmentos que mascara o contato com as rochas básicas encaixantes.

A canga química é constituída por concreções lateríticas cimentadas essencialmente por material argiloso, possuindo assim, uma condutividade hidráulica inferior que a canga de minério. Geralmente elas cobrem as rochas máficas decompostas e não possuem continuidade estrutural com as rochas subjacentes (MDGeo, 2010).

### 2.8.2 Sistema Hidrogeológico Paleovulcânico Superior

O Sistema Hidrogeológico Paleovulcânico Superior apresenta características análogas ao Sistema Parauapebas. De modo análogo aos basaltos de base, devido à sua constituição mineralógica, decompõem-se em um maciço formado essencialmente por argilo-minerais. Dessa maneira, essa unidade possui características de aquífero, com permeabilidade muito baixa (MDGeo, 2010).

### 2.8.3 Sistema Hidrogeológico Carajás

Esse sistema hidrogeológico é formado pelos litotipos representantes das formações ferríferas bandadas. Neste sistema distinguem-se fundamentalmente três unidades principais, quais sejam: hematitas friáveis, hematitas compactas e jaspilitos. Estas unidades se comportam como aquíferos, aquíferos ou aquícluses e se encontram recortadas por corpos concordantes (sills) e discordantes (diques) de rochas básicas.

Os diques correspondem a barreiras hidráulicas compartimentando os aquíferos, já os sills possuem drenança, devido a sua distribuição concordante com o acamamento e distribuição espacial localizada (MDGeo, 2010).

As hematitas friáveis constituem a unidade aquífera principal dentro desse sistema hidrogeológico. A gênese das hematitas friáveis, minério de alto teor, é admitida pela atuação conjunta de dois fenômenos: inicialmente teria havido uma alteração hidrotermal, com a substituição de sílica por carbonatos, e posteriormente, a atuação de um longo processo de lixiviação da sílica e carbonatos, gerando as hematitas ricas e friáveis (MDGeo, 2010).

Desse modo originou-se um material extremamente poroso e com elevada permeabilidade, fato comprovado pela alta vazão e capacidade específica dos poços para rebaixamento desse aquífero. Apresentam assim, porosidade intersticial predominante, com porosidade de fratura secundária, possuindo valores elevados de condutividade hidráulica e alto armazenamento (MDGeo, 2010).

A unidade aquífera das hematitas compactas possui porosidade fissural, em que seus sistemas de descontinuidades determinam a circulação de água. Não obstante, de maneira subordinada, podem-se notar poros que conferem certo grau de porosidade

primária. Esta unidade possui uma relativa elevada condutividade hidráulica e baixo coeficiente de armazenamento (MDGeo, 2010).

Os jaspilitos correspondem ao principal protominério dos depósitos de ferro de Carajás. São caracterizados por serem maciços e, via de regra, pouco fraturados. Trata-se de aquífero fissural por excelência, mas devido ao baixo grau de descontinuidades presentes, o mesmo pode ser considerado como um aquífero, comparado às demais unidades desse sistema, podendo até mesmo ter comportamento de aquícluse. Ocorre principalmente na base da formação ferrífera da mina N4E ou como lentes irregularmente distribuídas dentro das hematitas friáveis, podendo constituir barreiras hidráulicas secundárias (MDGeo, 2010).

#### 2.8.4 Sistema Hidrogeológico Parauapebas

O sistema hidrogeológico parauapebas constitui-se por espessa sequência de derrames basálticos na base da formação ferrífera. Trata-se de um sistema constituído, em geral, por rochas de baixa condutividade hidráulica.

Os aquíferos em basaltos decompostos ocorrem próximos à superfície, na zona de alteração das rochas cujas maiores espessuras são encontradas no contato com o sistema Hidrogeológico Carajás. Devido à sua constituição mineralógica, o produto de sua alteração é formado essencialmente por argilo-minerais. Dessa maneira, esta unidade possui características de aquífero, com permeabilidade muito baixa.

As rochas máficas são podem ser classificadas tanto como aquíferos ou como aquícluses, dependendo da presença de descontinuidades ou não, uma vez que a circulação de água nessas rochas se faz por meio das mesmas. Em geral, essas rochas exibem diversos sistemas de descontinuidades, mas com baixa interconexão, o que confere a essa unidade uma baixa condutividade hidráulica (MDGeo, 2010).

#### 2.8.5 Condições de Circulação da Água

A boa porosidade apresentada pela canga favorece a recarga em determinadas porções da área. Em contraposição, nas áreas de ocorrência de solos argilosos originários das rochas máficas a recarga é substancialmente menor. Quando a canga permeável conecta-se diretamente com a formação ferrífera, propicia uma boa recarga deste

aquífero em profundidade. Quando se apresenta sobreposta a algum horizonte menos permeável (camada argilosa), formam-se aquíferos rasos, com níveis d'água suspensos e nascentes em cotas elevadas (MDGeo, 2010).

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A metodologia usada na proposta do roteiro metodológico para a avaliação da qualidade das águas nas diversas fase de uma mina a céu aberto considerou as seguintes etapas.

1. Avaliação das fases do empreendimento com base nos planos de produção de minério.
2. Definição das principais etapas envolvidas nas diferentes fases da mina.
3. Estabelecimentos dos atores envolvidos e suas respectivas responsabilidades dentro das respectivas fases do empreendimento.
4. Aplicação inicial do modelo de avaliação nas fases de planejamento e instalação.
5. Reavaliação da consistência dos resultados iniciais e aplicação de ajustes.



#### 4 RESULTADOS

A Figura 7 mostra o roteiro metodológico das ações necessárias para avaliar a qualidade das águas na área de influência de uma mina a céu aberto. As ações vão desde a análise dos dados de monitoramento ambiental da fase de estudo ambiental da nova mina, até a implantação de procedimentos de ajustes quando observados desvios na qualidade das águas nas fases de instalação, operação e fechamento da mina. É importante considerar que as atividades propostas são para execução ao longo da vida útil do empreendimento e podem sofrer ajustes conforme a necessidade operacional e que, é essencial a participação de equipes da operação, planejamento de mina e meio ambiente na aplicação da mesma.

Os resultados obtidos com aplicação da metodologia poderão ser usados nos estudos ambientais futuros do empreendimento minerário, reduzindo o tempo com a checagem inicial de informações de qualidade das águas, além de custos com análises físico-químicas e hidrobiológicas.

Para avaliar se as ações descritas são as que podem garantir o objetivo da proposta metodológica, as etapas foram aplicadas no processo de abertura de uma nova mina a céu aberto cuja implantação iniciou-se em abril de 2012. Foram descritas as etapas associando-as a cada fase de atividade da mina a céu aberto.

**A avaliação da influência direta da mina a céu aberto** foi feita ainda na etapa de planejamento pelos responsáveis pelo estudo ambiental elaborado para subsidiar o licenciamento ambiental do projeto minerário, sendo feita em duas etapas. A primeira etapa foi feita em escritório usando bases cartográficas, topográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrográficas e pode ser alterada conforme variações encontradas nas bases de pesquisa inicial. Após a delimitação preliminar dessa área de influência direta, seguiu-se para a etapa de campo e reconhecimento, onde foi possível validar ou ajustar a mesma, descrever as características da vegetação, do solo, drenagens, geologia, presença de fauna, ocorrências antrópicas entre outras.

Após a etapa de definição da área de influência, iniciou-se a elaboração do plano de monitoramento, com a **escolha dos pontos de amostragem, variáveis, parâmetros e**

**frequência nas bacias de drenagem da mina a céu aberto**, bem como dos possíveis indicadores ambientais que foram usados no diagnóstico ambiental. Essa avaliação culminou na **elaboração do plano de monitoramento inicial da qualidade das águas para diagnóstico ambiental** da área e na proposta de plano básico ambiental da etapa de licenciamento ambiental. Ainda foi feita uma avaliação quando iniciadas as atividades para execução do plano de monitoramento inicial que consistiu em **checar em campo os procedimentos de amostragem, a localização e a suficiência dos pontos para o diagnóstico ambiental**. Essa etapa é muito importante dentro da metodologia utilizada, pois um diagnóstico equivocado pode levar a descrição de impactos não existentes, super ou sub estimados na área de influência direta, indicado uma matriz de aspectos e impactos ambientais errônea.

Assim que obtidos os resultados analíticos oriundos da aplicação do plano de monitoramento inicial é muito importante **avaliar a consistência dos resultados, a conformidade legal, variações sazonal, espacial e cálculo inicial das variáveis ambientais**. Essa etapa é primordial para a proposição de ajustes tanto em posicionamento dos pontos de amostragem quanto em parâmetros elegíveis para monitoramento, frequência de amostragem e definição dos indicadores de qualidade das águas.

Quando não se dispõe de uma caracterização inicial da área a ser estudada, a avaliação dos resultados iniciais deve ser feita usando-se dados da literatura e das legislações ambientais aplicáveis. A classificação temporal dos dados é uma ação relevante nessa etapa quando há variações significativas de uso do solo no entorno da rede de amostragem. É possível ainda agrupar os resultados em períodos sazonais e etapas distintas.

Durante a abertura de uma mina a céu aberto, as modificações vão desde a remoção da cobertura vegetal até as etapas de decapeamento e início da lavra. Com o aprofundamento da cava, já fase de operação, há ainda o rebaixamento do nível d'água dos aquíferos, o que propicia aumento no fluxo e possibilidade de alteração na qualidade das águas superficiais.

Após a execução da etapa que avalia a consistência dos resultados, a conformidade legal, variações sazonal, espacial e cálculo inicial das variáveis ambientais, é possível elaborar e implantar o **plano de monitoramento ambiental final** que poderá ser o mesmo até às etapas de operação e fechamento da mina. O plano de monitoramento é a ferramenta usada para validar os pontos selecionados, avaliar interferências e

procedimentos de amostragem e requer discussões rotineiras das equipes envolvidas na sua implantação.

Com o cumprimento das etapas de validação de dados, implantação do plano de monitoramento e classificação dos dados, executou-se **a avaliação da qualidade das águas em relação às interferências das atividades da mina nas diferentes fases e períodos**, aplicando o tratamento estatístico e a apresentação da caracterização das águas, seja por determinação de classes de enquadramento, elaboração de índices de qualidade ou determinação de valores de *background*. Tais resultados devem ser prontamente discutidos com a operação da mina de modo a possibilitar ajustes nos procedimentos operacionais, se necessário.

**Comparar os resultados das variáveis entre as etapas de planejamento, instalação da mina, operação e fechamento da mina** poderá indicar a adoção **de ajustes nos procedimentos operacionais** para garantir a manutenção das condições iniciais das variáveis ambientais.

Uma avaliação integrada dos resultados deve ser feita para que o impacto efetivo da operação de uma mina a céu aberto possa ser conhecido. **Deve-se integrar os dados em cada etapa** para que a avaliação possa ser representativa.

Finalmente se processam as etapas de **criação do banco de dados**, que poderá ser usado para alimentar os estudos futuros em novas minas a serem abertas na mesma área de exploração mineral. **É necessário que os responsáveis pela gestão da unidade operacional se apropriem dessas informações** para discutir rotineiramente os ajustes que deve ser realizados em todas as fases produtivas até o descomissionamento da mina

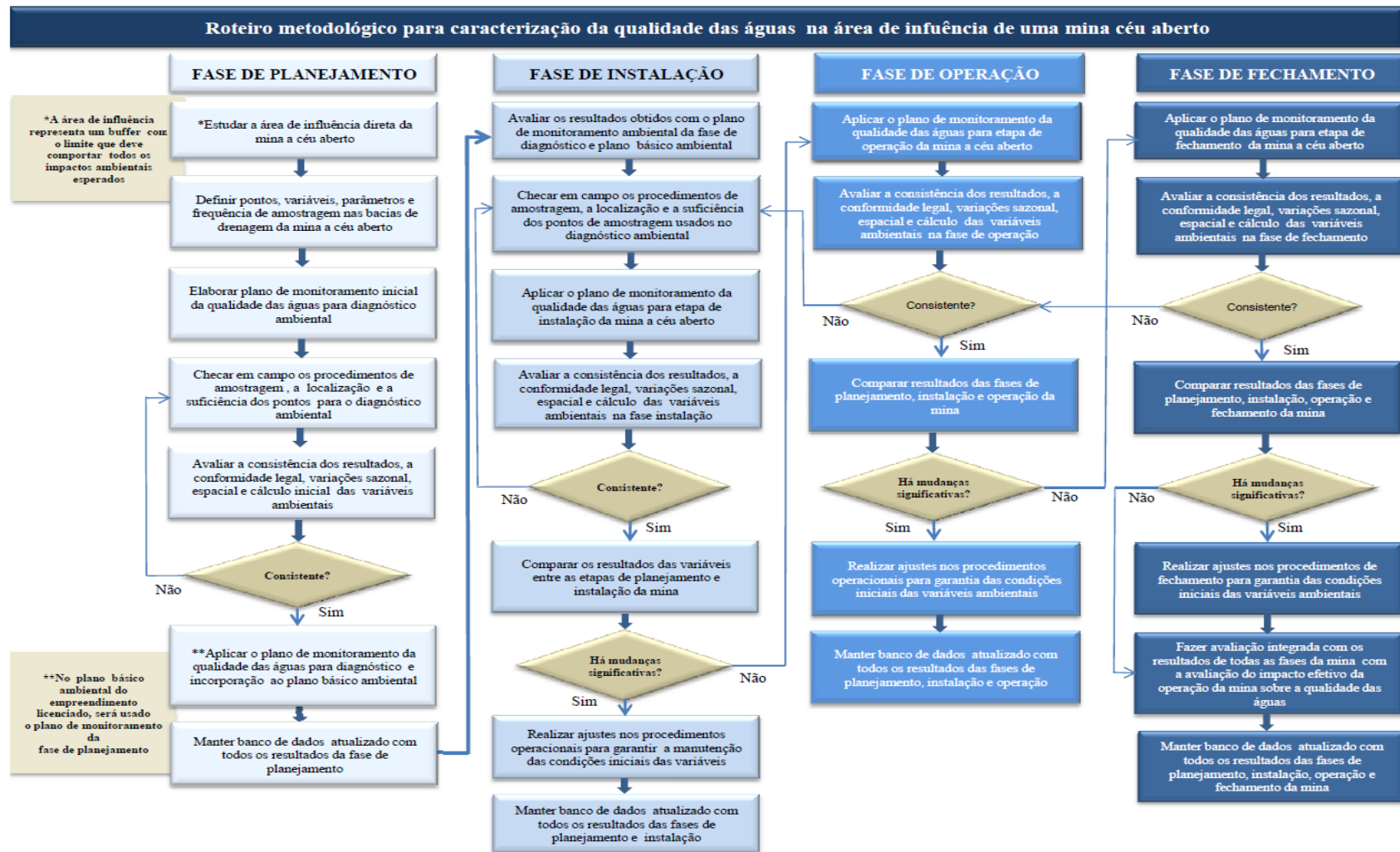


Figura 7 - Roteiro metodológico proposto para caracterização da qualidade das águas

## 4.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS

A metodologia estabelecida para avaliar a qualidade das águas em uma mina a céu aberto foi testada para um novo empreendimento dentro do complexo minerador de Carajás. Durante a elaboração dos estudos ambientais que subsidiaram o licenciamento da nova mina, foram estabelecidas as etapas necessárias para a aplicação do roteiro metodológico (Figura 7), antes do início das intervenções e durante as fases de implantação e início da operação.

Para a aplicação da metodologia, usou-se a base de dados de uma nova mina a céu aberto, cujo estudo ambiental foi realizado no ano de 2010. Durante a etapa de licenciamento ambiental da mina, foi definida uma rede de amostragem de águas que considerou as questões de topografia e direção de drenagens no entorno da futura cava, alocando pontos a montante e jusante das principais drenagens. Essa base de dados foi utilizada para o início das discussões da aplicabilidade de uso da mesma rede para medir as influências das etapas de instalação e operação.

A rede de monitoramento foi avaliada em campo onde fatores relacionados à direção do fluxo das águas, cota topográfica e características do entorno foram considerados. Para ajustar a rede de amostragem foram realizadas duas campanhas mensais que contaram com a participação da equipe técnica do laboratório responsável pelas análises físico-químicas e equipe de gestão ambiental.

### 4.1.1 Implantação do Plano de Monitoramento Ambiental

Com base na avaliação inicial feita sobre os dados obtidos no estudo de impacto ambiental da nova mina e depois de verificada as condições em campo da rede de amostragem, partiu-se para a definição do plano de monitoramento ambiental que segue um roteiro de etapas já definidas na avaliação da rede.

#### 4.1.1.1 Seleção dos pontos amostrais

A seleção dos pontos da rede de amostragem contemplou pontos representativos associados à ocorrência dos diferentes domínios lito-estratigráficos da área de drenagem ao entorno da mina.

Além dos critérios lito-estratigráficos também foram considerados pontos de avaliação posicionados em áreas com influência das atividades atuais de mineração, bem como mantidos os pontos de monitoramento estratégicos oriundos do Estudo de Impacto Ambiental citado.

#### 4.1.1.2 Seleção dos parâmetros analíticos

A seleção dos parâmetros foi feita com base nas legislações federais vigentes, que estabelecem condições e padrões para a qualidade das águas superficiais. Além desses, foram incorporados os parâmetros considerados básicos para a avaliação da qualidade das águas, a como pH, Turbidez, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e os indicadores associados a possíveis interferências do empreendimento. Ainda foram incluídos outros parâmetros não rotineiros de medição, com o objetivo de se obter uma avaliação inicial, para possibilitar ajustes durante o processo de monitoramento no rol de parâmetros selecionados.

#### 4.1.1.3 Frequência de coleta

Foi estabelecido inicialmente um período quinzenal de coletas, com o objetivo de fornecer informações sobre a adequação dos pontos selecionados, em termos de localização e possibilidade efetiva de coleta, considerando questões relacionadas ao relevo acidentado da área e a consequente dificuldade de acesso. Após essa etapa intensiva foram realizadas campanhas mensais por um período de doze meses para avaliação dos resultados iniciais em função das condições sazonais da região, principalmente no que refere a intensidade de chuvas. Nessa fase, já se torna possível a primeira análise estatística dos dados, pois já há um número de informações para a avaliação inicial.

#### 4.1.1.4 Procedimentos de coleta e ensaios

Os procedimentos de coleta e ensaios serão feitos por um laboratório terceirizado que possui acreditação junto à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios – RBLE, do Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO que usa os métodos descritos no

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater para os ensaios, e para coleta a Norma ABNT NBR 9898:1987.

#### 4.1.1.5 Tratamento inicial dos resultados

O tratamento dos resultados iniciais deve seguir as seguintes etapas:

- Análise de consistência dos resultados brutos.
- Comparação dos resultados com os limites legais.
- Avaliação da evolução temporal e sazonal dos resultados.
- Avaliação da variabilidade dos resultados.
- Avaliação da similaridade dos pontos de amostragem, de modo a agrupá-los de acordo com características naturais ou incorporadas.
- Cálculos de médias e seus intervalos de confiança e determinação de limites superiores e inferiores de controle para estabelecer os valores a serem propostos de *background* e *baseline* para os parâmetros de qualidade das águas.
- Avaliação dos principais fatores de influência aos valores propostos de *background* e *baseline*.
- Avaliação comparativa do Índice de Qualidade da Água-IQA e classificação da rede de monitoramento.

#### 4.1.1.6 Legislação aplicável

Para a avaliação dos resultados serão utilizadas as condições e padrões estabelecidos pela legislação federal, uma vez que a área de estudo é dentro de uma área de conservação federal:

- a. Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- b. Resolução CONAMA N° 397, de 03 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4° e a Tabela X do § 5°, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA N° 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação

dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

- c. Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de Maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.
- d. Resolução CONAMA Nº 396, de 03 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

O Quadro 1 apresenta o plano de monitoramento ambiental inicial com a descrição dos pontos, localização na rede de drenagem, coordenadas geográficas, características litológicas, frequência de monitoramento e parâmetros físico-químicos e biológicos.

A Figura 8 mostra o mapa amostral com a localização dos pontos de monitoramento dentro da rede de drenagem no entorno da mina. É possível observar no mapa, o avanço nas intervenções na área da mina, sendo o ano de 2011, a condição inicial de uso do solo. Em 2012 já são observadas mudanças na supressão de vegetação e início do decapamento e, em 2013 a operação de lavra já em desenvolvimento.



**Quadro 1 - Plano inicial de monitoramento das águas superficiais**

Ponto de Monitoramento	Descrição da Locação	Frequência de Monitoramento	Litologia de Contribuição	Coordenadas Geográficas UTM – SAD69/22		Parâmetros de Monitoramento
				X	Y	
P33	Bacia leste do Igarapé Jacaré	Mensal	Rocha máfica	597.856	9.325.315	Alcalinidade de Bicarbonato, Alumínio Dissolvido, Antimônio Total, Arsênio Total, Bário Total, Berílio Total, Boro Total, Cádmio Total, Chumbo Total, Cianeto Livre, Cloreto Total, Clorofila a, Cobalto Total, Cobre Dissolvido, Coliformes Termotolerantes, Condutividade Elétrica, Cor Verdadeira, Cromo Total, DBO, Fenóis Totais, Ferro Dissolvido, Ferro Total, Fluoreto Total, Fósforo Total, Lítio Total, Manganês Dissolvido, Manganês Total, Mercúrio Total, Níquel Total, Nitrato, Nitrito, Nitrogênio Amoniacal Total, Óleos e Graxas, Oxigênio Dissolvido, pH, Prata Total, Selênio Total, Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos em Suspensão Totais, Sulfato Total, Sulfeto (H2S não dissociado), Substâncias tensoativas que reagem com o azul de metileno, Temperatura do Ar, Temperatura da água, Turbidez, Urânio Total, Vanádio Total, Zinco Total.
P34	Igarapé Jacarezinho	Mensal	Formação ferrífera/máfica	595.284	9.325.641	
P35	Bacia do Igarapé Jacarezinho	Mensal	Rocha máfica	596.492	9.322.762	
P36	Igarapé Jacaré	Mensal	Rocha máfica	595.359	9.321.527	
P37	Bacia do Igarapé Jacaré	Mensal	Rocha máfica	594.403	9.323.181	
P07 (J02)	Igarapé Jacarezinho	Mensal	Formação ferrífera/máfica	595.946	9.326.674	
P10 (J01)	Igarapé Jacarezinho	Mensal	Formação ferrífera/máfica	595.711	9.325.051	

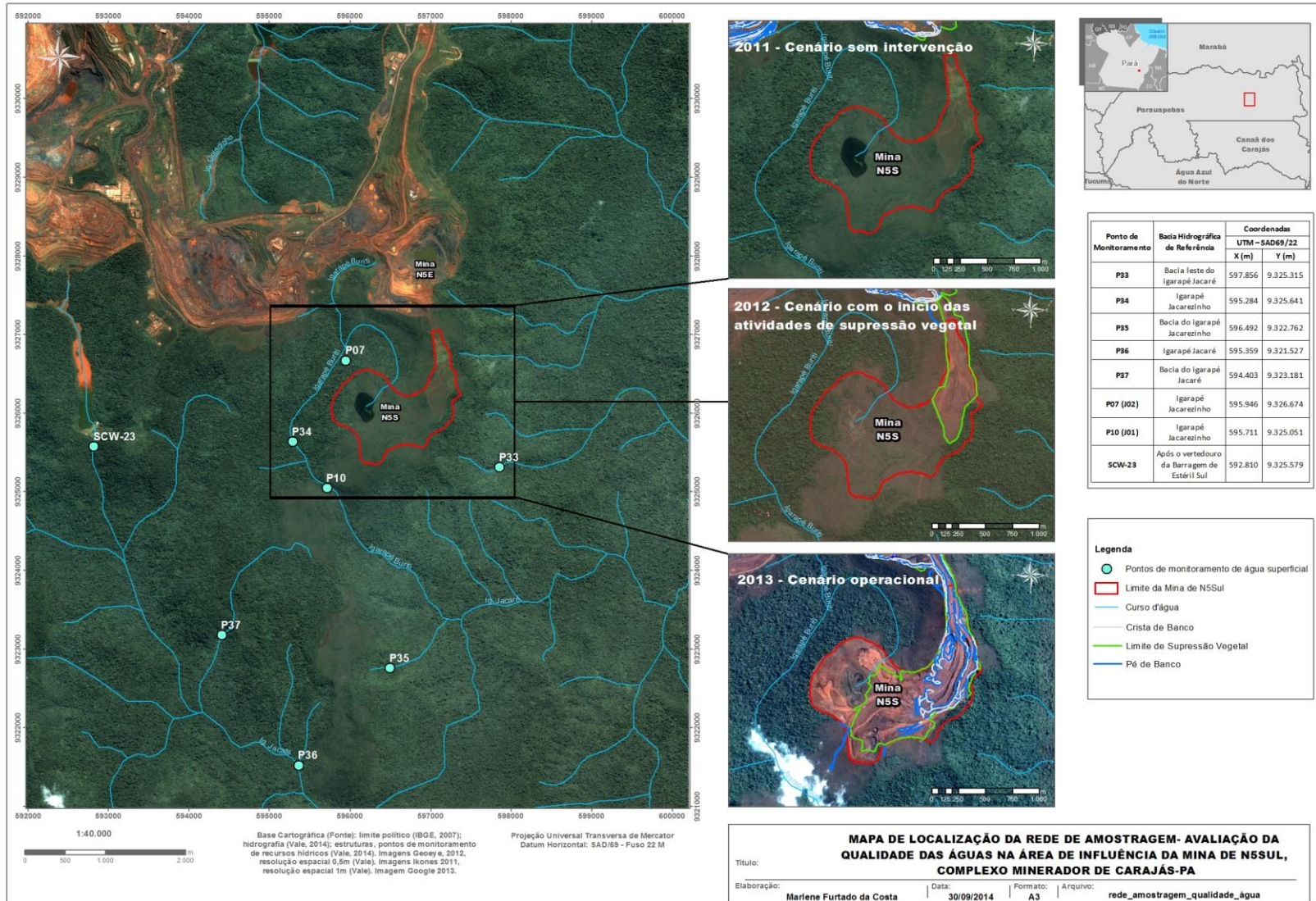


Figura 8 - Mapa de localização dos pontos de monitoramento

Os resultados do monitoramento durante o período de agosto de 2011 até janeiro de 2013 foram tratados de modo a possibilitar a comparação entre as fases sem interferência das atividades da mina em 2011 com as fases de abertura em abril de 2012 e início de sua operação em janeiro de 2013.

Os dados de monitoramento obtidos durante o referido período foram avaliados quanto à condição média e sua adequação às classes de qualidade das águas estabelecidas pela Resolução CONAMA 357/2005 para os seguintes parâmetros selecionados: Cor verdadeira, oxigênio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, cobre dissolvido, chumbo total, cádmio total, alumínio dissolvido, turbidez, sólidos dissolvidos totais, óleos e graxas e fenóis totais.

Com o objetivo de avaliar as condições de *background* para a qualidade das águas na área da mina, foram calculados os valores de UCL95 para esses mesmos parâmetros, em três períodos definidos – antes e após o início da operação da mina e durante todo o período considerado. Para os parâmetros cobre dissolvido, fenóis totais, ferro dissolvido e manganês total, para cada um destes períodos foi ainda realizada comparação entre as medianas (Teste de Mann-Whitney), a fim de verificar se as séries de dados apresentam mesma distribuição, bem como uma avaliação de tendência, através do Teste de Mann-Kendall, que foi aplicado separadamente para os dois períodos e também para a série completa de dados.

Essa comparação foi essencial para avaliar se a tendência observada na série de dados avaliados, com e sem interferência das operações da mina, se mantém ou não ao se comparar a série total de resultados.

O Índice de Qualidade das Águas foi calculado para cada período avaliado de modo a comparar condições de qualidade já existentes antes do início das operações da nova mina, possibilitando com isso ratificar que tais condições são tão associadas à influência sazonal quanto à mudança de uso do solo.

## 4.2 TRATAMENTO DOS DADOS

A caracterização da qualidade das águas superficiais fundamentou-se nos resultados analíticos dos ensaios físicos, químicos e biológicos dos pontos de amostragem localizados nas bacias do igarapé Jacaré (P33, P36 e P37) e do igarapé Jacarezinho (P07, P10, P34 e P35), bem como um ponto localizado após o vertedouro da Barragem de Estéril Sul (SCW-23).

A rede de monitoramento definida inicialmente era composta de nove pontos, da qual dois foram suprimidos, devido à impossibilidade de coleta no período chuvoso para o ponto P06, bacia do igarapé Jacarezinho, constituído de uma área alagada, e o ponto P05, igarapé Buriti, por apresentar a drenagem seca durante o período de estiagem. O ponto SCW-23 foi adicionado posteriormente à rede de monitoramento das águas superficiais, a partir de janeiro de 2012, porém o seu monitoramento foi feito equivocadamente como ponto de água subterrânea nas primeiras duas campanhas, contemplando análises dos parâmetros apropriados para essa matriz. A partir de maio de 2012 as análises foram regularizadas e passaram a contemplar os parâmetros adequados para águas superficiais.

Assim, a rede de monitoramento final de águas superficiais desse trabalho ficou composta por oito pontos de amostragem. O Quadro 2 apresenta a rede final com informações sobre a localização dos pontos de monitoramento, coordenadas geográficas e parâmetros selecionados para análise.

Nos pontos de monitoramento, foram coletadas amostras do tipo simples, de superfície. A amostragem seguiu as técnicas preconizadas pela norma ABNT NBR 9898:1987 – “Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores” e pelo método 1060 – “*Collection and preservation of samples*” do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* – SMEWW, 22ª Edição. Os métodos analíticos adotados baseiam-se nos procedimentos do SMEWW e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB.

**Quadro 2 - Rede final de monitoramento das águas superficiais**

Ponto de Monitoramento	Bacia Hidrográfica de Referência	Litologia Associada à Área de Drenagem/Contribuição de Água Subterrânea	Coordenadas UTM – SAD69/22		Parâmetros de Monitoramento	
			X (m)	Y (m)		
P33	Bacia leste do igarapé Jacaré	Rocha Máfica (Fm. Parauapebas)	597.856	9.325.315	Amônia, Potencial redox in loco.	Alcalinidade de bicarbonato, Alumínio dissolvido, Antimônio total, Arsênio total, Bário total, Berílio total, Boro total, Cádmi total, Chumbo total, Cianeto livre, Cloreto total, Clorofila a, Cobalto total, Cobre dissolvido, Coliformes termotolerantes, Condutividade elétrica, Cor verdadeira, Cromo hexavalente, Cromo total, Cromo trivalente, DBO, Fenóis totais, Ferro dissolvido, Ferro Total, Fluoreto Total, Fósforo total, Lítio total, Manganês dissolvido, Manganês total, Mercúrio total, Níquel total, Nitrato, Nitrito, Nitrogênio amoniacal total, Óleos e graxas, Oxigênio dissolvido, pH, Prata total, Selênio total, Sólidos dissolvidos totais, Sólidos em suspensão totais, Sulfato total, Sulfeto (H <sub>2</sub> S não dissociado), Substâncias tensoativas que reagem com o azul de metileno, Temperatura do ar, Temperatura da água, Turbidez, Urânio total, Vanádio total, Zinco total.
P34	Igarapé Jacarezinho	Formação Ferrífera/Máfica (Fm. Carajás e Fm. Parauapebas)	595.284	9.325.641		
P35	Bacia do igarapé Jacarezinho	Rocha máfica (Fm. Parauapebas)	596.492	9.322.762		
P36	Igarapé Jacaré	Rocha máfica (Fm. Parauapebas)	595.359	9.321.527		
P37	Bacia do igarapé Jacaré	Rocha máfica (Fm. Parauapebas)	594.403	9.323.181		
P07 (J02)	Igarapé Jacarezinho	Formação ferrífera/máfica (Fm. Carajás e Fm. Parauapebas)	595.946	9.326.674		
P10 (J01)	Igarapé Jacarezinho	Formação ferrífera/máfica (Fm. Carajás e Fm. Parauapebas)	595.711	9.325.051		
SCW-23	Após o vertedouro da Barragem de Estéril Sul	Estrutura de controle ambiental que recebe a drenagem das pilhas de disposição de estéril sul	592.810	9.325.579		

A base de dados para aplicação da proposta metodológica do presente trabalho englobou os resultados dos ensaios laboratoriais do período de agosto de 2011 a janeiro de 2013, os quais foram organizados e, após realização de sua análise de consistência, utilizados nos cálculos estatísticos e apresentados em forma gráfica, quando aplicável, subsidiando assim sua avaliação.

Para a avaliação da possível interferência das atividades minerárias sobre os cursos de água localizados no entorno da Mina de N5Sul, foram adotados dois períodos. O primeiro de agosto de 2011 a março de 2012, anteriormente a fase de operação da mina, e de abril de 2012 a janeiro de 2013, já com as atividades de operação iniciadas.

As seguintes premissas foram adotadas para a realização dos cálculos estatísticos básicos:

- Os pontos com menos de dois resultados, para a composição da média ou mediana, não foram contemplados nessa avaliação, uma vez que não possuem representatividade estatística.
- Foi empregada a média aritmética, à exceção do parâmetro coliformes termotolerantes, para o qual foi adotada a média geométrica.
- Os resultados dos parâmetros informados como menor que o limite de quantificação – LQ foram descartados quando o LQ apresentou valor superior ao limite legal.
- Para os resultados dos parâmetros informados como menor que o LQ, compreendidos entre o intervalo em que este limite é maior que um terço do valor do limite legal, até o valor coincidente com o limite legal, foi adotado como valor a metade do LQ.
- Para os resultados informados como menor que o LQ, mas com este limite igual ou menor que um terço do limite legal, foi considerado o próprio valor do LQ.

Cabe mencionar que não foram observados casos em que os limites de quantificação dos ensaios fossem superiores aos padrões legais aplicáveis, de forma que a sua avaliação comparativamente à legislação não foi prejudicada.

Para a caracterização da qualidade das águas, inicialmente, os resultados analíticos foram confrontados com as condições e padrões de qualidade definidos na Legislação Federal – Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem

como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências – considerando-se os corpos de água monitorados como águas doces de classe 2. Tal proposição foi tomada com base no Artigo 42 da citada Resolução, que estabelece que:

*“Enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2, as salinas e salobras classe 1, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente.”*

O conjunto de dados de monitoramento utilizados neste estudo está apresentado nas Tabelas A.1 a A.8 do Apêndice A.

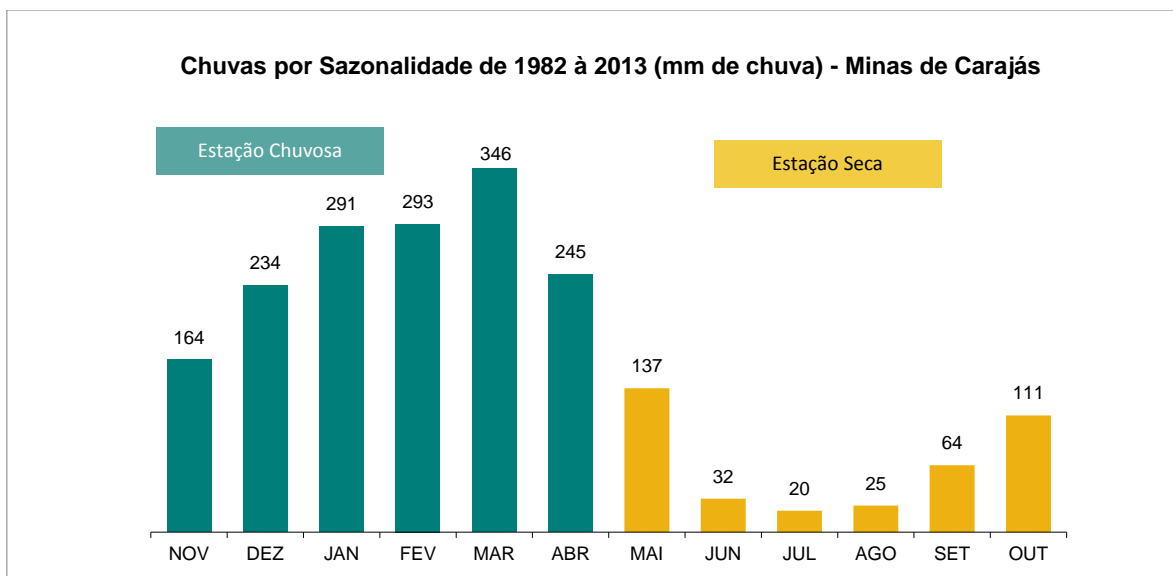
#### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA NA MINA DE N5SUL

Os resultados obtidos nos dois períodos amostrais foram comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005, que estabelece o padrão e classifica os corpos d'água em classes específicas.

As Tabelas 3 a 10 apresentam as médias calculadas que permitem comparação entre a condição média de qualidade atual das águas superficiais, frente às classes de qualidade, por ponto de amostragem.

As médias foram calculadas tanto para a fase anterior a abertura da mina (1º período) quanto na fase da mina em operação (2º período), nas estações de estiagem e de chuvas, que são bem relevantes na bacia de drenagem da Mina de N5Sul.

Na região de Carajás, os períodos sazonais são bem definidos, sendo basicamente compostos por duas estações climáticas, sendo uma chuvosa que vai de novembro a março e uma de estiagem de abril a outubro. A Figura 9 mostra o comportamento do período chuvoso na região das minas de ferro de Carajás.

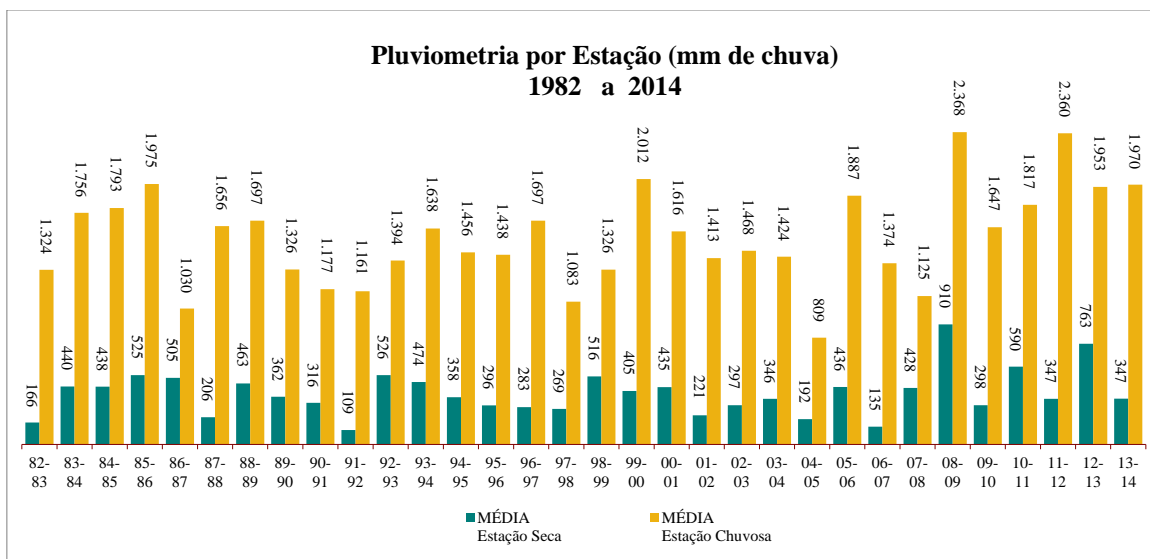


**Figura 9 - Dados históricos de chuvas na estação da mina de ferro de Carajás**

Conforme apresentado, observa-se que na série histórica com dados levantados desde o ano de 1982 até o ano de 2013, as maiores médias mensais de chuva são evidenciadas nos meses de janeiro a março, com pico de 346 mm de chuva no mês de março, enquanto que o período de menores valores são entre os meses de junho a agosto, com valor de 20 mm de chuva em agosto.

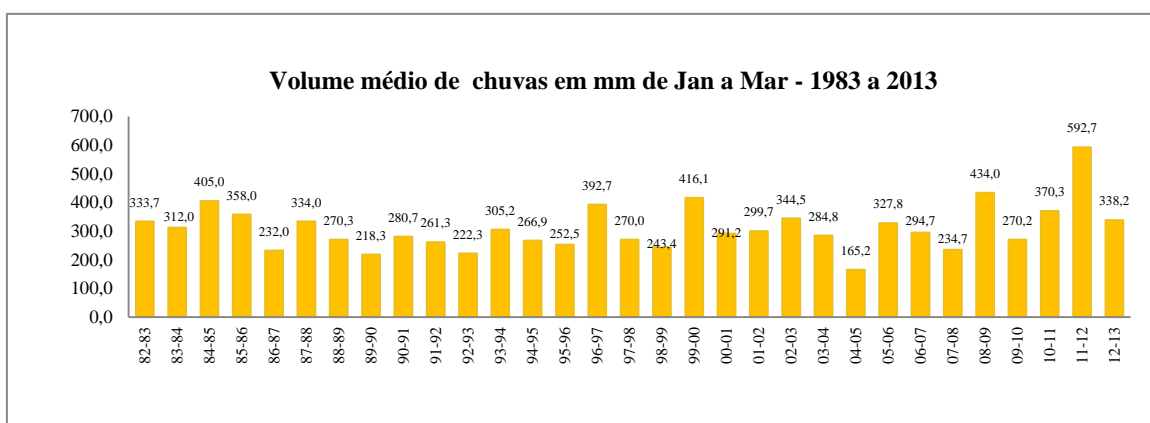
Essa amplitude grande de chuvas exerce influência na variação observada nas concentrações dos principais parâmetros medidos durante o período de observação, considerando que nos anos de 2011 a 2013, foi observada a segunda maior média sazonal em volume de chuvas de toda a série histórica de 32 anos de medições, mostrado na Figura 10, chegando a 2360 mm, ficando atrás apenas do período chuvoso entre os anos de 2008 e 2009.





**Figura 10 - Dados históricos de comparação sazonal ano a ano de toda a série histórica**

Quando se usa como comparação os meses com maiores volumes de chuvas, que para a região de Carajás são representados pelos meses de janeiro a março, é possível evidenciar dentro da série histórica que o ano de 2012 possui a maior média de volumes de chuvas medidos, chegando a atingir 592,7 mm (Figura 11).



**Figura 11 - Comparação volume de chuvas Jan-Mar de toda a série histórica**

Tabela 3 - Condição média de qualidade da água no ponto SCW-23

Parâmetro	Período Estiagem ago/11-out/11	Chuvras nov/11-mar/12	1º Período ago/11-mar/12	Estiagem abr/12-out/12	Chuvras nov/12-jan/13	2º Período abr/12-jan13
pH	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Turbidez	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cor Verdadeira	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Sólidos Dissolvidos Totais	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cloreto Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Sulfato Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Sulfeto	-	-	-	-	-	-
Fósforo Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Nítrog. Amoniacoal Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Nitrato	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Nitrito	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Oxigênio Dissolvido	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
DBO	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cianeto Livre	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Fenóis Totais	-	-	-	Classe 3	Classe 1	Classe 1
Óleos e Graxas	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Substâncias Tensoativas	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Colif. Termotolerantes	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Clorofila a	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Alumínio Dissolvido	-	-	-	Classe 1	Classe 3	Classe 1
Antimônio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Arsênio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Bário Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Berílio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Boro Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cádmio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Chumbo Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cobalto Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cobre Dissolvido	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Cromo Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Ferro Dissolvido	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Fluoreto Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Lítio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Manganês Total	-	-	-	Classe 3	Classe 3	Classe 3
Mercúrio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Níquel Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Prata Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Selênio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Urânio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Vanádio Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Zinco Total	-	-	-	Classe 1	Classe 1	Classe 1

















Para os parâmetros assinalados com (-) o cálculo da média foi inviabilizado devido ao número de resultados disponibilizados ser inferior a dois dados por período ou estação, conforme detalhado nas premissas apresentadas anteriormente. É importante salientar que nesta análise foram consideradas as classes de melhor qualidade compatíveis com os valores obtidos no cálculo da condição média, ou seja, uma vez que para algumas variáveis o padrão de qualidade é similar entre duas ou mais classes, foi representada aquela de qualidade mais restritiva. Com base nas tabelas que representam cada ponto de monitoramento estudado é possível definir diferenças consideráveis que dependem tanto da localização do mesmo na rede de amostragem, quanto da influência sazonal. Além disso, são apresentados nos Quadros 3 a 5 as condições médias calculadas de qualidade das águas, que permitem comparação entre a condição média de qualidade atual das águas superficiais, frente às classes de qualidade, por ponto de amostragem. As médias foram calculadas para os parâmetros cor verdadeira, oxigênio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, cobre dissolvido, chumbo total, cádmio total, alumínio dissolvido, turbidez, sólidos dissolvidos totais, óleos e graxas e fenóis totais, no período completo de dados, abrangido neste estudo. A Figura 12 mostra a distribuição das classes de qualidade dos principais parâmetros nos pontos da rede de monitoramento da qualidade da água da mina de N5Sul.

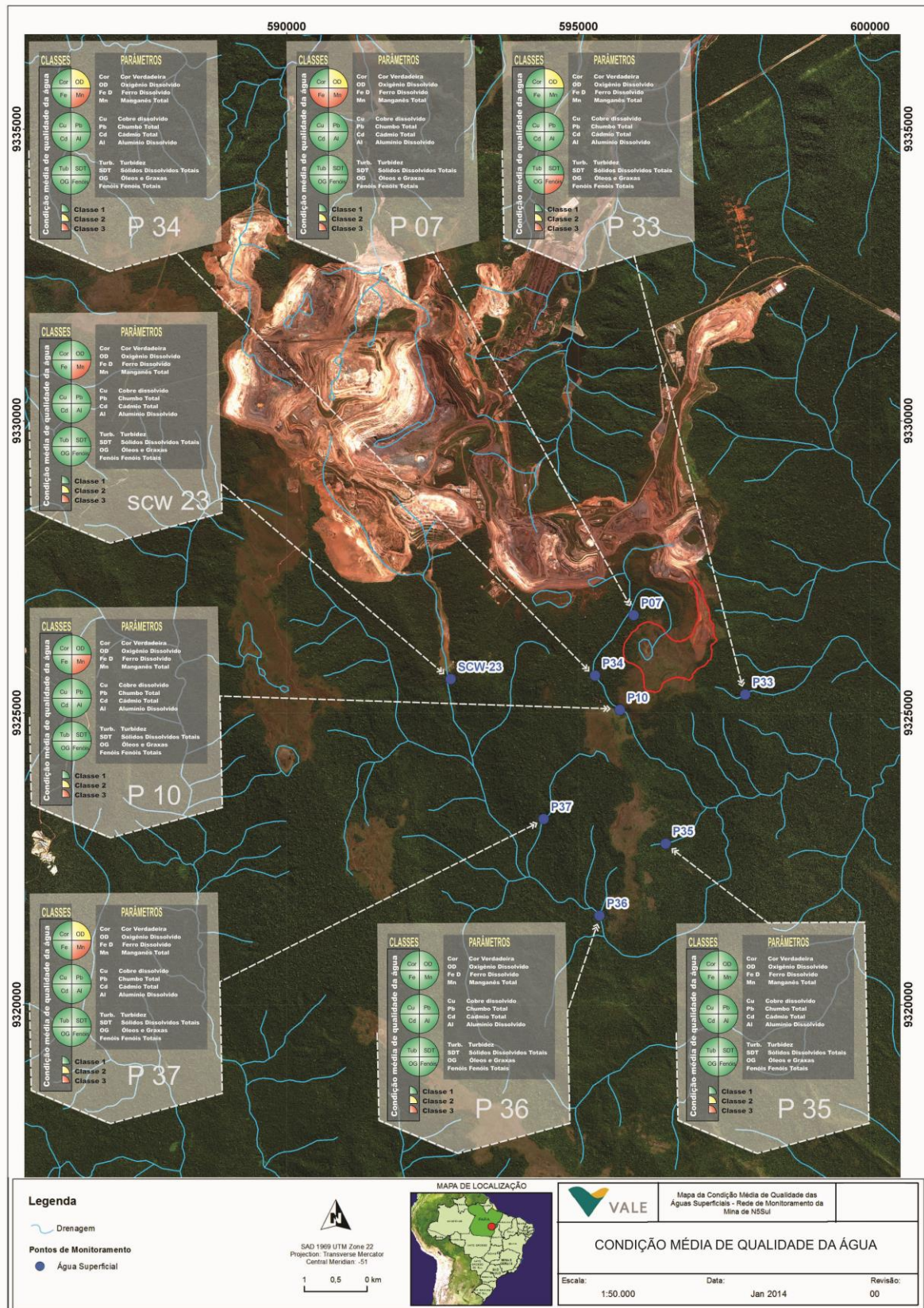


Figura 12 - Diagramas de condição média da qualidade da água em N5Sul

Quadro 3 - Condição média para cor, oxigênio, ferro e manganês

Parâmetros Avaliados				
Ponto	Cor verdadeira	Oxigênio dissolvido	Ferro dissolvido	Manganês total
P07	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 3
P10	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 3
P33	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 1
P34	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 3
P35	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P36	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P37	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 3
SCW-23	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 3

Quadro 4 - Condição para cobre, chumbo, cádmio e alumínio

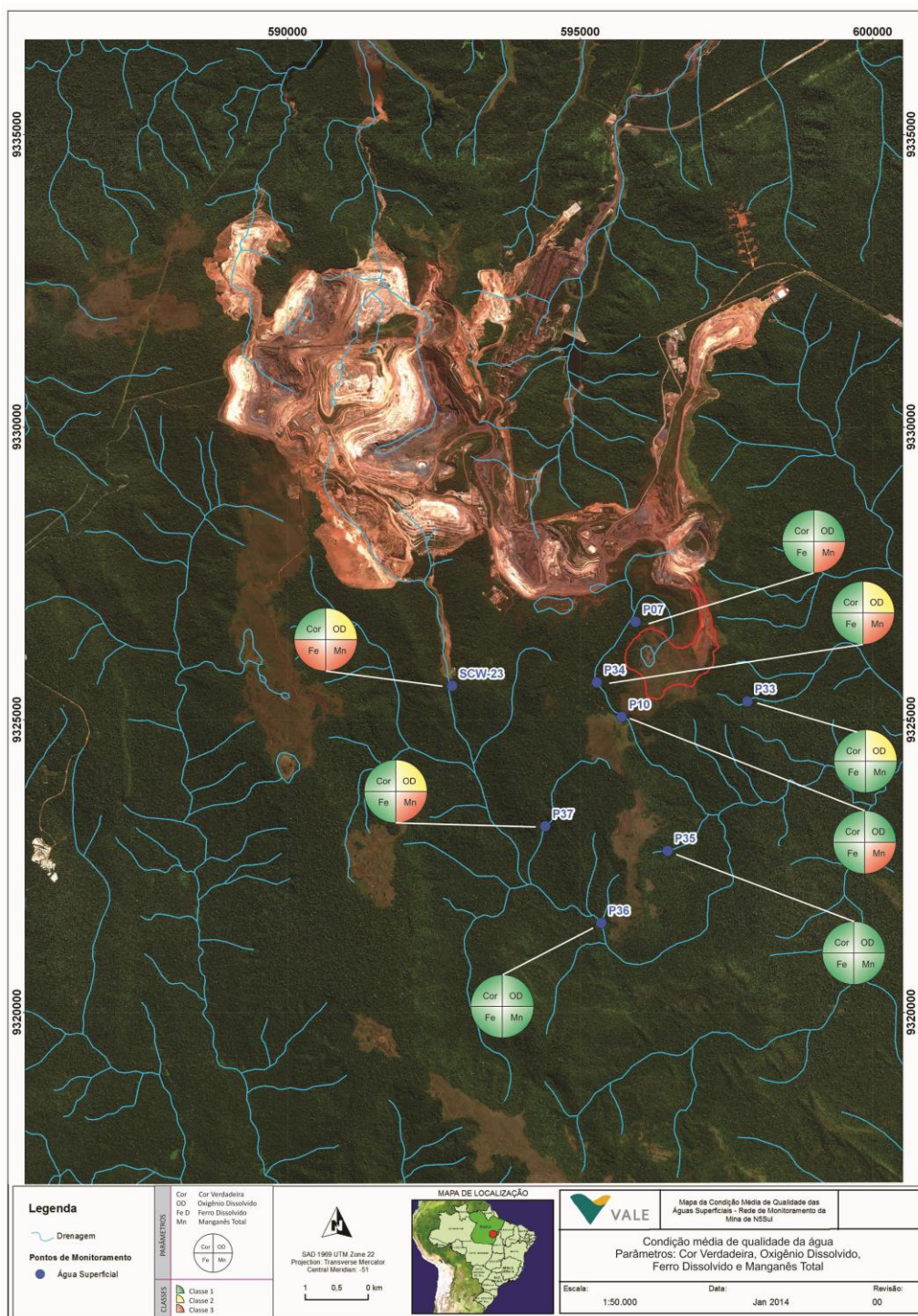
Parâmetros Avaliados				
Ponto	Cobre dissolvido	Chumbo total	Cádmio total	Alumínio dissolvido
P07	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P10	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P33	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P34	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P35	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P36	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P37	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
SCW-23	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1

Quadro 5 - Condição média para turbidez, sólidos dissolvido, óleos e graxas e fenóis

Parâmetros Avaliados				
Ponto	Turbidez	Sólidos dissolvidos totais	Óleos e graxas	Fenóis totais
P07	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P10	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P33	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 3
P34	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P35	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P36	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
P37	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
SCW-23	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1



A Figura 13, apresenta a distribuição das classes de qualidade para os parâmetros cor, ferro dissolvido, manganês total e oxigênio dissolvido ao longo da rede de monitoramento da qualidade das águas da mina de N5Sul.



**Figura 13 - Diagramas de condição média de alguns parâmetros em N5Sul**

É importante salientar que nesta análise foram consideradas as classes de melhor qualidade compatíveis com os valores obtidos no cálculo da condição média, ou seja,

uma vez que para algumas variáveis o padrão de qualidade é similar entre duas ou mais classes, foi representada aquela de qualidade mais restritiva.

O ponto SCW 23, localizado no Igarapé Jacaré, após a saída da barragem de sedimentos Estéril Sul, apresentou quase a totalidade das medições dos parâmetros enquadrados como classe 1. As exceções foram os parâmetros alumínio dissolvido, que nas campanhas de chuvas de 2012 a 2013 ficou na classe 3, e manganês total, que foi enquadrado como classe 3 em todas as campanhas realizadas.

Outros pontos pertencentes a bacia do Igarapé Jacaré, P37 e P36, localizados em uma posição sem nenhuma interferência de operação de mina, apresentaram comportamento semelhante ao ponto localizado a montante, SCW 23- Após o vertedouro da Barragem de Estéril Sul, com quase a totalidade dos parâmetros enquadrados na classe 1, tendo para o parâmetro manganês total, o mesmo comportamento no período chuvoso entre novembro de 2012 e janeiro de 2013. Especificamente o parâmetro manganês total foi enquadrado como classe 3 e classe 4, para os pontos P36 e P37, respectivamente. Além do manganês total, o oxigênio dissolvido, medido em todas as campanhas do ponto P37, foi enquadrado como classe 3, o que se justifica pela presença de grande quantidade de matéria orgânica na área de drenagem, ocasionando a depleção de oxigênio dissolvido nas águas dessa área.

O ponto P35, na porção leste da Bacia do Igarapé Jacarezinho teve todos os parâmetros físico-químicos e biológicos enquadrados na classe 1. A acidez proporcionada pela presença de ácidos húmicos e fúlvicos desse tipo de ambiente ocasiona a não classificação do pH para quase a totalidade das medições realizadas em todos os pontos e períodos sazonais.

O ponto P07, localizado no Igarapé Buriti, na área de influência da Mina de N5W e N5E, que operam há mais de quinze anos, apresentou as mesmas alterações de classe para manganês total, no período de estiagem de 2011, sendo enquadrado como classe 4, na estiagem de agosto a outubro de 2011 e classe 3, de agosto de 2011 a março de 2012. De novembro de 2012 a janeiro de 2013, a classificação mudou para classe 1.

A jusante do ponto P07, os pontos P34 e P10 ainda na bacia do Igarapé Buriti, apresentaram classificação diferente de classe 1 para ferro dissolvido, no período chuvoso tanto de 2011 para 2012 quanto para 2012 e 2013.

#### 4.4 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA - IQA DA MINA DE N5SUL

Complementarmente, foi incorporado a avaliação da qualidade das águas da Mina de N5Sul o indicador – Índice de Qualidade das Águas – IQA. O IQA, desenvolvido em 1970 pela “*National Sanitation Foundation (NSF)*” dos Estados Unidos, é amplamente utilizado no Brasil na gestão dos recursos hídricos. Essa metodologia compreende a modelagem de nove parâmetros de qualidade: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio, fosfato total, nitrato, temperatura, turbidez e sólidos totais. O IQA varia de 0 a 100 e quanto menor seu valor, pior a qualidade da água relacionada à degradação por esgotos domésticos e outros materiais orgânicos, sólidos e nutrientes. As faixas de qualidade adotadas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas de Minas Gerais – IGAM – e que serão empregadas neste estudo constam do Quadro 6.

**Quadro 6 - Classificação do índice de qualidade das águas – IQA**

Nível de Qualidade	Faixa
Excelente	$90 < IQA \leq 100$
Bom	$70 < IQA \leq 90$
Médio	$50 < IQA \leq 70$
Ruim	$25 < IQA \leq 50$
Muito Ruim	$0 < IQA \leq 25$

Fonte: IGAM (2010)

Os resultados do IQA são apresentados para cada ponto de monitoramento, nas Tabelas 11 a 18. Além disso, as Figura 14 e 15 mostram, graficamente e espacialmente, os resultados do IQA por período para cada ponto nos dois cenários avaliados.

Tabela 11- Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto SCW-23

SCW-23			
Altitude: 588 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	16/01/2012	-	-
	17/02/2012	-	-
2º período	30/05/2012	75,0	Bom
	20/07/2012	87,9	Bom
	30/08/2012	75,8	Bom
	13/09/2012	-	-
	25/10/2012	79,6	Bom
	15/11/2012	79,7	Bom
	31/01/2013	86,2	Bom

Tabela 12 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P37

P37			
Altitude: 501 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	27/08/2011	81,1	Bom
	06/09/2011	78,9	Bom
	10/09/2011	78,5	Bom
	15/09/2011	68,5	Médio
	11/10/2011	80,2	Bom
	11/11/2011	71,6	Bom
	05/12/2011	77,3	Bom
	20/01/2012	68,1	Médio
	24/03/2012	71,2	Bom
2º período	30/04/2012	69,0	Médio
	26/05/2012	72,0	Bom
	30/06/2012	71,8	Bom
	20/07/2012	80,4	Bom
	30/08/2012	78,6	Bom
	28/09/2012	-	-
	26/10/2012	-	-
	15/11/2012	-	-



Tabela 13 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P36

P36			
Altitude: 364 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	05/09/2011	79,0	Bom
	08/09/2011	82,0	Bom
	10/09/2011	80,5	Bom
	11/09/2011	80,4	Bom
	16/09/2011	69,6	Médio
	24/10/2011	61,3	Médio
	12/11/2011	75,3	Bom
	07/12/2011	74,9	Bom
	24/03/2012	69,8	Médio
2º período	29/04/2012	83,7	Bom
	21/07/2012	79,9	Bom
	10/08/2012	82,9	Bom
	29/10/2012	-	-
	28/11/2012	-	-

Tabela 14 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P07

P07			
Altitude: 658 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	23/08/2011	0,0	Muito Ruim
	06/09/2011	77,8	Bom
	08/09/2011	75,8	Bom
	10/09/2011	76,7	Bom
	21/10/2011	85,8	Bom
	08/11/2011	80,3	Bom
	08/12/2011	66,1	Médio
	20/01/2012	64,7	Médio
	29/02/2012	81,4	Bom
	30/03/2012	80,5	Bom
2º período	27/04/2012	69,9	Médio
	29/06/2012	82,3	Bom
	24/09/2012	76,3	Bom
	18/10/2012	73,9	Bom
	28/11/2012	81,4	Bom
31/01/2013	72,7	Bom	

Tabela 15 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P34

P34			
Altitude: 640 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	02/09/2011	72,1	Bom
	06/09/2011	81,7	Bom
	08/09/2011	82,1	Bom
	10/09/2011	82,2	Bom
	14/09/2011	56,8	Médio
	21/10/2011	82,0	Bom
	08/11/2011	76,7	Bom
	06/12/2011	65,1	Médio
	05/01/2012	70,5	Bom
	30/03/2012	71,5	Bom
2º período	28/04/2012	78,8	Bom
	26/05/2012	72,3	Bom
	29/06/2012	83,9	Bom
	30/08/2012	76,6	Bom
	28/09/2012	-	-
	18/10/2012	-	-
	26/11/2012	-	-
	31/01/2013	-	-

Tabela 16 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P10

P10			
Altitude: 609 m			
Campanha		Valor do IQA	Nível de Qualidade
1º período	22/08/2011	48,2	Ruim
	06/09/2011	81,4	Bom
	08/09/2011	78,5	Bom
	10/09/2011	78,1	Bom
	21/10/2011	66,5	Médio
	08/11/2011	76,7	Bom
	06/12/2011	59,7	Médio
	05/01/2012	67,9	Médio
2º período	08/02/2012	67,1	Médio
	28/04/2012	77,3	Bom
	26/05/2012	83,0	Bom
	29/06/2012	77,3	Bom
	30/08/2012	67,9	Médio
	26/09/2012	69,7	Médio
	18/10/2012	75,1	Bom
	26/11/2012	72,6	Bom
31/01/2013	67,6	Médio	

**Tabela 17 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P35**

P35			
Altitude: 491 m			
Campanha	Valor do IQA	Nível de Qualidade	
1º período	27/08/2011	56,0	Médio
	06/09/2011	80,0	Bom
	08/09/2011	82,4	Bom
	10/09/2011	81,6	Bom
	15/09/2011	69,1	Médio
	24/10/2011	69,5	Médio
	11/11/2011	72,0	Bom
	06/12/2011	80,6	Bom
	17/01/2012	92,8	Excelente
	09/02/2012	87,4	Bom
	24/03/2012	78,8	Bom
2º período	28/04/2012	74,6	Bom
	26/05/2012	67,0	Médio
	30/06/2012	73,4	Bom
	21/07/2012	-	-
	24/08/2012	78,8	Bom
	26/10/2012	75,1	Bom
	15/11/2012	70,6	Bom
18/01/2013	73,8	Bom	

**Tabela 18 - Resultados do Índice de Qualidade das Águas – IQA no Ponto P33**

P33			
Altitude: 472 m			
Campanha	Valor do IQA	Nível de Qualidade	
1º período	06/09/2011	71,9	Bom
	08/09/2011	71,6	Bom
	10/09/2011	72,0	Bom
	15/09/2011	68,1	Médio
	19/10/2011	71,2	Bom
	11/11/2011	75,9	Bom
	07/12/2011	72,3	Bom
	12/01/2012	71,9	Bom
	29/02/2012	75,6	Bom
2º período	27/04/2012	67,8	Médio
	31/05/2012	65,1	Médio
	29/10/2012	80,6	Bom
	28/11/2012	79,4	Bom

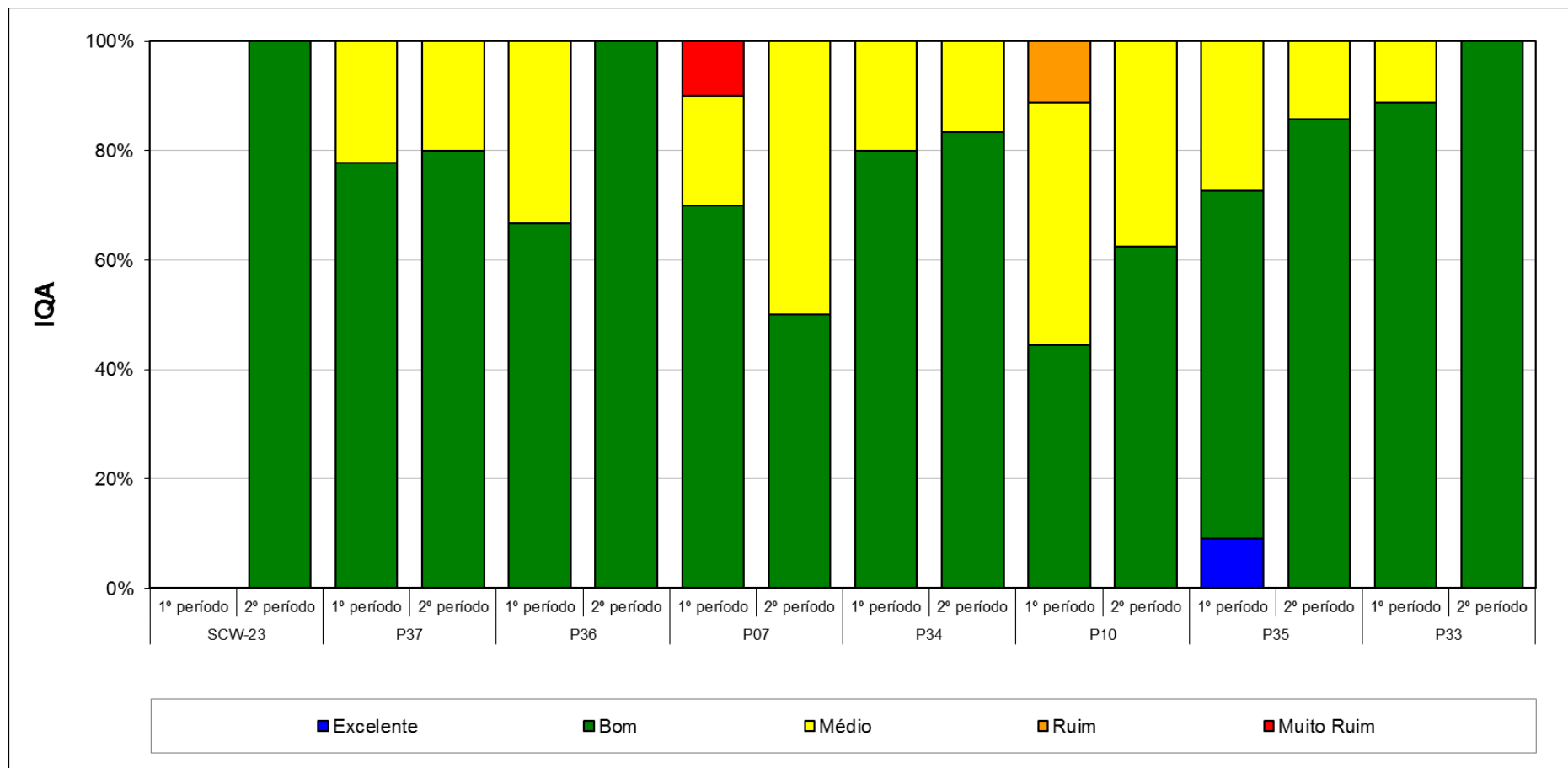


Figura 14 - Gráfico de distribuição do Índice de Qualidade das Águas – IQA

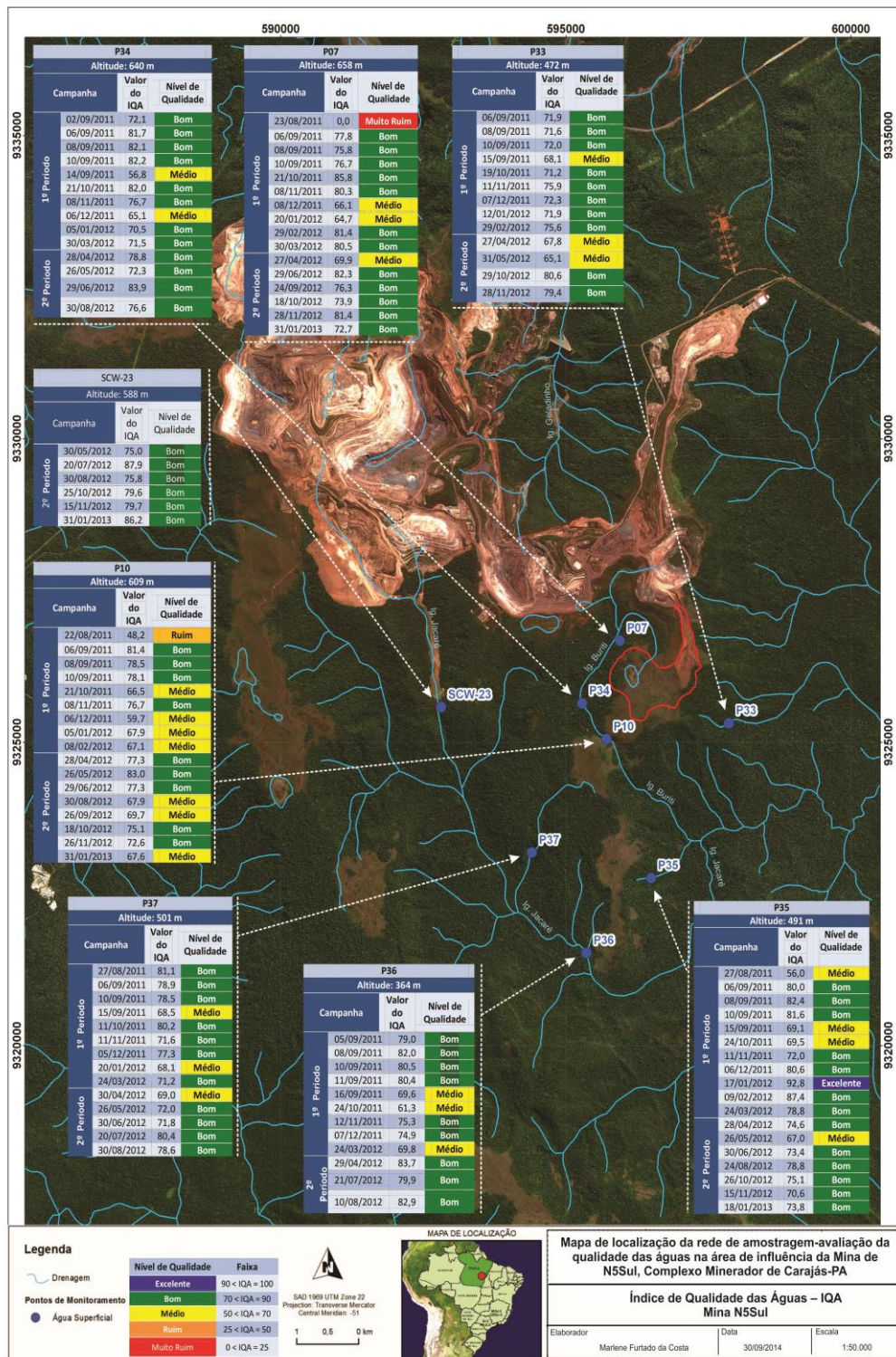


Figura 15 - Distribuição do IQA na mina de N5Sul

Na avaliação dos resultados do Índice de Qualidade da Água-IQA, observa-se que de um modo geral somente nos pontos P07 e P10, ambos localizados no Igarapé Jacarezinho, há índices de qualidades calculados em “Muito Ruim” e “Ruim”,

respectivamente, medidos na campanha de agosto de 2011. Nesses dois casos, a ocorrência de coliformes termotolerantes e oxigênio dissolvido fora dos limites preconizados na Resolução CONAMA 357/2005 foi o motivo pelo qual o índice de qualidade se mostrou com essa classificação. Tal condição pode ser considerada como natural em virtude das modificações já ocorridas na bacia de drenagem pela presença de matéria orgânica transportada no período chuvoso, o que altera de forma relevante as concentrações de oxigênio dissolvido. Em relação aos coliformes termotolerantes, é comum que em uma área de floresta nativa haja presença de animais, que influenciam no aporte desse parâmetro.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DE *BACKGROUND/BASELINE*

A estimação do *background/baseline* para os parâmetros cor verdadeira, oxigênio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, cobre dissolvido, chumbo total, cádmio total, alumínio dissolvido, turbidez, sólidos dissolvidos totais, óleos e graxas e fenóis totais, foi baseada nas medições realizadas no período contemplado neste estudo, sendo que os cálculos foram realizados utilizando-se três diferentes grupos de dados, quais sejam:

- a série temporal completa;
- os resultados obtidos no 1º período, compreendido entre agosto/2011 a março/2012 (anteriormente ao início das atividades minerárias na área);
- os resultados obtidos no 2º período, compreendido entre abril/2012 e janeiro/2013 (após início da operação da mina).

Inicialmente, foram feitos cálculos para cada ponto e para os seguintes conjuntos de pontos de monitoramento: pontos P35, P36, P37 (indicados pelo IBAMA para serem utilizados para esta finalidade); pontos P07, P10, P34 e P33; e todos os pontos. Após os cálculos, observou-se a influência significativa do ponto P07 sobre os conjuntos de dados, motivo pelo qual foi considerado adequado complementar os cálculos para novos conjuntos, isentos do ponto P07, formando-se assim os conjuntos adicionais constituídos pelos pontos P10, P34 e P33 e de todos os pontos exceto P07. Considerando o propósito de comparação entre os períodos anterior e posterior à operação da mina, o ponto SCW-23 não foi contemplado nos cálculos que se seguem, devido à insuficiência de dados referentes ao primeiro período. Foi empregado para os

cálculos o método que se utiliza do Teorema do Limite Central ajustado, descrito em [EPA, 2002]<sup>1</sup>. O método é desenvolvido conforme as premissas e os passos seguintes:

1) Considerando que  $X_1, X_2, \dots, X_n$  representam  $n$  resultados de medição da concentração do parâmetro de interesse, realizadas em amostras aleatórias,

2) calcula-se a média,  $\bar{X}$ , dos resultados conforme a equação [1]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad [1]$$

3) e o desvio-padrão,  $s$ , segundo [2]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [2]$$

4) Para cada amostra, calcula-se a assimetria,  $\beta$ , de acordo com a equação [3]<sup>2</sup>.

$$\beta = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{s} \right)^3 \quad [3]$$

5) Seja  $z_\alpha$  o quantil de ordem  $(1 - \alpha)$  da distribuição normal padrão. Para o intervalo de confiança de 95%,  $z_\alpha = 1,645$ .

6) Então, o Limite Superior de Confiança unilateral do intervalo de confiança de 95%,  $LSC_{1-\alpha}$ , é dado pela equação [4]:

$$LSC_{1-\alpha} = \bar{X} + \left( z_\alpha + \frac{\beta}{6 \cdot \sqrt{n}} \cdot (1 + 2 \cdot z_\alpha^2) \right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [4]$$

As Tabelas 19 a 21 apresentam os valores de *background/baseline* obtidos para os parâmetros selecionados, nos pontos de águas superficiais. Ressalte-se que para o cálculo do *background/baseline*, para os resultados inferiores ao limite de quantificação (<LQ), o próprio LQ foi adotado, pois define o conhecimento do parâmetro representado.

<sup>1</sup> "If sample size is sufficiently large, the Central Limit Theorem (CLT) implies that the mean will be normally distributed, no matter how complex the underlying distribution of concentrations might be. This is the case even if the underlying distribution is strongly skewed, has outliers, or is a mixture of different populations, so long as it is stationary (not changing over time), has finite variance, and the samples are collected independently and randomly. However, the theorem does not say how many samples are sufficient for normality to hold. When sample size is moderate or small the means will not generally be normally distributed, and this non-normality is intensified by the skewness of the underlying distribution." [EPA, 2002]

<sup>2</sup> O valor da assimetria pode ser calculado com o emprego da função **DISTORÇÃO(núm1;núm2; ...)** de MS-Excel®.

Tabela 19 - Concentrações de *background* para cor, oxigênio, ferro e manganês

Parâmetro	Cor verdadeira (mg Pt/L)			Oxigênio dissolvido (mg O2/L)			Ferro dissolvido (mg Fe/L)			Manganês total (mg Mn/L)		
	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013
Ponto	1º período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo	1º período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo
P07	53	34	41	6,2	6,9	6,3	2,241	0,166	1,389	0,881	0,133	0,583
P10	55	107	74	6,5	7,0	6,5	0,471	0,415	0,391	0,062	0,335	0,204
P33	35	5	27	6,4	6,2	6,1	0,226	0,100	0,192	0,060	0,323	0,174
P34	47	156	91	6,3	7,0	6,4	0,433	0,456	0,396	0,348	0,435	0,305
P35	18	6	13	6,9	6,6	6,6	0,181	0,100	0,142	0,050	0,099	0,074
P36	16	5	12	7,3	7,3	7,1	0,123	0,100	0,114	0,203	0,204	0,165
P37	18	6	13	6,9	6,6	6,6	0,181	0,100	0,142	0,050	0,099	0,074
Conjunto P07 P10 P33 P34	38	78	51	6,1	6,5	6,1	0,789	0,296	0,547	0,332	0,252	0,266
Conjunto P10 P33 P34	37	95	58	6,1	6,5	6,2	0,331	0,343	0,312	0,166	0,301	0,196
Conjunto P35 P36 P37	16	7	12	6,7	6,5	6,5	0,138	0,107	0,121	0,097	0,230	0,141
Todos os pontos	28	45	33	6,3	6,4	6,2	0,501	0,203	0,348	0,219	0,212	0,192
Todos os pontos exceto P07	25	48	33	6,3	6,4	6,3	0,228	0,214	0,210	0,116	0,230	0,150



Tabela 20 - Concentrações de *background* para cobre, chumbo, cádmio e alumínio

Parâmetro	Cobre dissolvido (mg Cu/L)			Chumbo total (mg Pb/L)			Cádmio total (mg Cd/L)			Alumínio dissolvido (mg Al/L)		
	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013
Ponto	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo
P07	0,009	0,020	0,014	0,017	0,010	0,014	0,001	0,001	0,001	0,067	0,055	0,061
P10	0,009	0,010	0,009	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,133	0,074	0,097
P33	0,009	0,010	0,009	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,093	0,050	0,080
P34	0,009	0,019	0,013	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,117	0,101	0,098
P35	0,009	0,032	0,020	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,077	0,050	0,064
P36	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,050	0,050	0,050
P37	0,009	0,032	0,020	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,077	0,050	0,064
Conjunto P07 P10 P33 P34	0,009	0,013	0,011	0,012	0,010	0,011	0,001	0,001	0,001	0,085	0,071	0,075
Conjunto P10 P33 P34	0,009	0,013	0,011	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,094	0,077	0,082
Conjunto P35 P36 P37	0,009	0,018	0,013	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,060	0,073	0,062
Todos os pontos	0,009	0,014	0,011	0,011	0,010	0,011	0,001	0,001	0,001	0,071	0,067	0,067
Todos os pontos exceto P07	0,009	0,014	0,011	0,010	0,010	0,010	0,001	0,001	0,001	0,074	0,070	0,069

Tabela 21- Concentrações de *background* para turbidez, sólidos, óleos e graxas e fenóis

Parâmetro	Turbidez (NTU)			Sólidos dissolvidos totais (mg/L)			Óleos e graxas (mg/L)			Fenóis totais (mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/L)		
	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013	ago/2011-mar/2012	abr/2012-jan/2013	ago/2011-jan/2013
Ponto	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo	1º Período	2º Período	período completo
P07	18,9	6,0	13,3	24,6	35,8	28,0	8,0	4,0	6,0	0,003	0,003	0,003
P10	3,3	11,9	7,6	23,4	54,0	41,2	4,7	1,4	3,5	0,004	0,001	0,003
P33	5,5	14,6	8,2	20,0	63,4	36,4	5,0	4,6	4,9	0,022	0,001	0,016
P34	24,2	9,9	16,4	39,1	61,0	46,9	4,8	3,3	4,0	0,003	0,001	0,002
P35	8,4	2,5	5,2	20,3	34,6	27,5	5,0	2,5	4,0	0,005	0,002	0,003
P36	15,8	11,0	11,9	45,6	60,8	49,1	5,0	3,7	4,5	0,002	0,001	0,002
P37	8,4	2,5	5,2	20,3	34,6	27,5	5,0	2,5	4,0	0,005	0,002	0,003
Conjunto P07 P10 P33 P34	11,2	8,5	9,4	26,0	47,8	34,6	5,4	2,7	4,2	0,007	0,002	0,004
Conjunto P10 P33 P34	10,8	9,9	9,5	27,4	53,2	38,0	4,8	2,7	3,8	0,009	0,001	0,005
Conjunto P35 P36 P37	7,2	4,9	5,5	30,1	39,7	33,1	5,0	2,3	3,9	0,003	0,002	0,002
Todos os pontos	8,4	6,4	7,0	26,5	42,1	32,8	5,2	2,3	3,9	0,005	0,001	0,003
Todos os pontos exceto P07	7,6	6,7	6,6	27,3	44,1	34,2	4,9	2,2	3,7	0,005	0,001	0,003

Em complementação ao tratamento estatístico apresentado, foi ainda empregado um teste de tendência de séries temporais – Teste de Mann-Kendall (univariado). O método é desenvolvido conforme as premissas e os passos seguintes.

### 1) Premissas

- (1)  $y_1, y_2, \dots, y_n$  formam um conjunto de respostas medidas de um fenômeno;
- (2) as respostas foram medidas sucessivamente (ao longo do tempo), de  $y_1$  para  $y_n$ ; correspondem ao conjunto dos tempos  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .

### 2) Problema

As respostas aparentam configurar tendência monotônica crescente ou decrescente e é necessário testar a significância dessa tendência.

### 3) Solução

O teste de Mann-Kendall é um teste não paramétrico, baseado no ranqueamento (hierarquização) das respostas, para testar se a tendência da série temporal é estatisticamente significativa. Por ser não paramétrico, o teste não exige que as respostas sigam uma distribuição conhecida. O teste é aplicável a tendências crescentes ou decrescentes da variável-resposta  $y$ , dado um período de tempo.

### 4) Medida estatística de Mann-Kendall, S

O cálculo de  $S$  leva em conta todos os possíveis diferentes pares de valores  $(y_j, y_i)$  da variável-resposta da série temporal. Cada par de valores recebe um escore ao se comparar um valor  $y_j$  ao valor anterior da variável-resposta no par,  $y_i$ .

Se o número de valores da variável-resposta é  $n$ , então o número total dos diferentes pares de valores  $(y_j, y_i)$  é:

$$N = \frac{n(n - 1)}{2} \quad [1]$$

- Se o valor anterior  $y_i$  é menor do que o valor  $y_j$  no par de valores  $(y_j, y_i)$ , então o escore do par é  $r_k = 1$ ;
- se o valor anterior  $y_i$  é maior do que o valor  $y_j$  no par de valores  $(y_j, y_i)$ , então o escore do par é  $r_k = -1$  e
- se o valor anterior  $y_i$  é igual ao valor  $y_j$  no par de valores  $(y_j, y_i)$ , então o escore do par é  $r_k = 0$ .

Atribuídos os escores, calcula-se o valor de  $S$ :

$$S = \sum_{k=1}^N r_k \quad [2]$$

Os valores que  $S$  pode assumir têm o seguinte sentido:

- Um valor positivo de  $S$  indica que as diferenças entre dois valores  $(y_j, y_i)$ , um posterior e outro anterior na série temporal, são em sua maioria positivas, o que sugere uma tendência potencialmente crescente ao longo do tempo.
- Da mesma forma, um valor de  $S$  menor que zero sugere uma tendência potencialmente decrescente.
- Já os valores de  $S$  próximos de zero indicam que aproximadamente o mesmo número de escores positivos e negativos foram atribuídos aos diferentes pares  $(y_j, y_i)$ , sugerindo assim que os valores da variável-resposta não apresentam tendência ao longo do tempo.

Quanto maior o valor absoluto de  $S$ , maior forte é a evidência de que se verifica uma tendência dos dados da série temporal. Entretanto, para dar conta da aleatoriedade e da variabilidade inerente das medições da variável-resposta, a significância estatística do  $S$  calculado deve ser determinada.

### 5) Hipóteses a serem testadas

$H_0$ , hipótese nula: as observações proveem de uma população em que são independentes e identicamente distribuídas, ou seja, não são tendenciosas (as observações são estacionárias).

$H_A$ , hipótese alternativa: as observações do conjunto apresentam tendência monotônica ao longo do tempo, quer seja crescente, decrescente ou inespecífica (bilateral).

### 6) Distribuição de S

Na vigência da hipótese nula,  $H_0$ , tem média zero, ou seja,  $E[S] = 0$ .

Para amostras grandes ( $n > 22$ ),  $S$  é uma variável aproximadamente normal, mas é razoável que se tenha isso como premissa mesmo se a amostra for pequena. O desvio padrão  $dp(S)$  é calculado pela seguinte equação:

$$dp(S) = \sqrt{\frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_1^g t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right]} \quad [3]$$

Em que  $g$  representa o número de grupos de resultados idênticos e  $t_j$  é o número de resultados idênticos no  $j$  – ésimo grupo.

O valor padronizado da variável aleatória  $S$  é dado por:

$$Z = \frac{(S - 1)}{dp(S)}, \text{ para } S > 0 \quad [4]$$

$$Z = 0, \text{ para } S = 0 \quad [5]$$

$$Z = \frac{(S + 1)}{dp(S)}, \text{ para } S < 0 \quad [6]$$

A variável padronizada  $Z$  indica a direção de uma tendência potencial do mesmo modo que a variável aleatória  $S$ .

A significância estatística de uma tendência é calculada comparando-se  $Z$  ao valor crítico da distribuição normal,  $z_\alpha$ , da distribuição normal padronizada. A área sob a curva normal à direita de  $z_\alpha$  é igual a  $\alpha$ .

Os testes de tendência foram conduzidos para os parâmetros cobre dissolvido, fenóis totais, ferro dissolvido e manganês total, utilizando-se três diferentes grupos de dados, quais sejam:

- a série temporal completa;
- os resultados obtidos no 1º período, compreendido entre agosto/2011 a março/2012 (anteriormente ao início das atividades minerárias na área);
- os resultados obtidos no 2º período, compreendido entre abril/2012 e janeiro/2013 (após início da operação da mina);

São apresentados no Anexo B os gráficos de tendência produzidos para os grupos de séries temporais supracitados.

Ressalte-se que, no nível especificado de significância (0,05), para o ponto P07, as séries temporais completas de resultados de ferro dissolvido e de manganês total apresentaram evidência estatisticamente significativa de tendência decrescente, enquanto para os pontos P33, P35 e P37, foi observada evidência estatisticamente significativa de tendência crescente nas concentrações de manganês total, quando avaliadas as séries temporais completas. Para os demais pontos e parâmetros, as séries completas não apresentaram evidência estatisticamente significativa de tendência. O Quadro 6 resume os resultados do teste aplicado para cada ponto, parâmetro e período.

Quadro 6 - Resumo dos resultados do teste de tendência

Ponto	Parâmetro	Período	Evidência estatisticamente significativa suficiente para caracterização de tendência?
P07	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	S
		1º período	N
		2º período	N
Manganês total	Série temporal completa	S	
	1º período	N	
	2º período	N	
P10	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
Manganês total	Série temporal completa	N	
	1º período	N	
	2º período	N	
P33	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
Manganês total	Série temporal completa	S	
	1º período	N	
	2º período	N	

Continuação Quadro 6 - Resumo dos resultados do teste de tendência

Ponto	Parâmetro	Período	Evidência estatisticamente significativa suficiente para caracterização de tendência?
P34	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Manganês total	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
P35	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Manganês total	Série temporal completa	S
		1º período	N
		2º período	N
P36	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Manganês total	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N



**Continuação Quadro 6 - Resumo dos resultados do teste de tendência**

Ponto	Parâmetro	Período	Evidência estatisticamente significativa suficiente para caracterização de tendência?
P37	Cobre Dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Fenóis Totais	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Ferro dissolvido	Série temporal completa	N
		1º período	N
		2º período	N
	Manganês total	Série temporal completa	S
		1º período	N
		2º período	N

Para cada ponto foi também realizado um teste de comparação entre as medianas – Teste de Mann-Whitney – para as séries de dados referentes a cada período, para os parâmetros cobre dissolvido, fenóis totais, ferro dissolvido e manganês total, a fim de verificar se as séries de dados apresentam mesma distribuição.

Quando se dispõe de uma amostra pequena e a variável numérica não apresenta sabidamente uma variação normal, ou quando não se é possível verificar esta condição satisfatoriamente, ou ainda, quando não há homogeneidade das variâncias (embora exista uma correção no teste  $t$  que considera as variâncias desiguais), o teste  $t$  não é apropriado. Para exemplificar uma situação onde o teste  $t$  acusaria falsamente uma associação estatisticamente significativa, consideremos que em um dos dois grupos se observe um *outlier*. Em função desse único valor, em sendo muito maior que os outros, o grupo a que ele pertence apresentará uma média elevada, o que aumentará a estatística do teste  $t$ , com um conseqüente  $p$ -valor associado pequeno.

O teste de Mann-Whitney (U) pode ser considerado a versão não paramétrica do teste  $t$ , para amostras independentes. Ao contrário do teste  $t$ , que testa a igualdade das médias, o teste U testa a igualdade das medianas. Os valores de U calculados pelo teste avaliam o grau de entrelaçamento dos dados dos dois grupos após a ordenação. A maior separação dos dados em conjunto indica que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas.

A lógica do teste é a mesma do teste  $t$ : calcula-se uma certa estatística de teste e obtém-se o  $p$ -valor a partir da distribuição amostral dessa estatística sob  $H_0$ . A diferença é que ao invés de construir essa estatística com dados originais, eles são previamente convertidos em postos (ordenações). A estatística  $U$ , que é a base para a decisão sobre a aceitação ou não da hipótese de nulidade é calculada da seguinte maneira:

- É formado um conjunto  $W$ , com todos os dados das duas amostras (A e B).
- O conjunto  $W$  é ordenado de forma crescente.
- Registra-se a ordem de cada elemento deste conjunto.
- Separam-se novamente as amostras A e B.
- O valor de  $U$  é a soma das ordens da amostra A.

Quanto mais baixo for o valor de  $U$ , maior será a evidência de que as populações são diferentes. Isso se explica porque  $U$  é a soma de ordens, portanto seu valor será baixo se na categoria A estiverem os primeiros da ordem (obviamente em B estarão os dados de ordem superior). É claro então que neste caso se evidencia uma diferença entre as populações.

Se as diferenças entre as situações forem aleatórias, como é postulado pela hipótese nula, então os resultados devem ser aproximadamente os mesmos e, conseqüentemente, as ordens devem ser também aproximadamente as mesmas para as duas situações. Se houver uma preponderância de ordens altas ou baixas numa situação ou na outra, então é porque a diferença no total dos resultados ordenados para cada situação é devida aos efeitos previstos da variável independente e não ao acaso. Se a soma total das ordens for muito baixa para uma das situações, então terá de haver uma preponderância de ordens elevadas na outra situação. Quanto menor for  $U$ , mais significativas serão as diferenças entre as ordens das duas situações.

Com base neste teste, foram identificadas medianas diferentes entre as séries de dados do 1º e 2º período para o parâmetro ferro dissolvido no ponto P07 e, para manganês total, nos pontos P33, P35 e P37. Para os demais pontos e parâmetros, não há evidências de que as medianas sejam diferentes. A Tabela 22 a seguir resume os resultados do teste aplicado para cada ponto e parâmetro.

**Tabela 22 - Resumo dos resultados do teste de comparação de medianas**

Ponto	Parâmetro	Evidências de que as medianas sejam diferentes?	Probabilidade de igualdade
P07	Cobre Dissolvido	N	27%
	Fenóis Totais	N	96%
	Ferro dissolvido	S	0,31%
	Manganês total	N	42%
P10	Cobre Dissolvido	N	47%
	Fenóis Totais	N	11%
	Ferro dissolvido	N	70%
	Manganês total	N	37%
P33	Cobre Dissolvido	N	60%
	Fenóis Totais	N	41%
	Ferro dissolvido	N	126%
	Manganês total	S.	0,28%
P34	Cobre Dissolvido	N	20%
	Fenóis Totais	N	54%
	Ferro dissolvido	N	40%
	Manganês total	N	100%
P35	Cobre Dissolvido	N	76%
	Fenóis Totais	N	45%
	Ferro dissolvido	N	76%
	Manganês total	S	0,43%
P36	Cobre Dissolvido	N	100%
	Fenóis Totais	N	57%
	Ferro dissolvido	N	31%
	Manganês total	N	14%
P37	Cobre Dissolvido	N	100%
	Fenóis Totais	N	100%
	Ferro dissolvido	N	100%
	Manganês total	S	1,71%

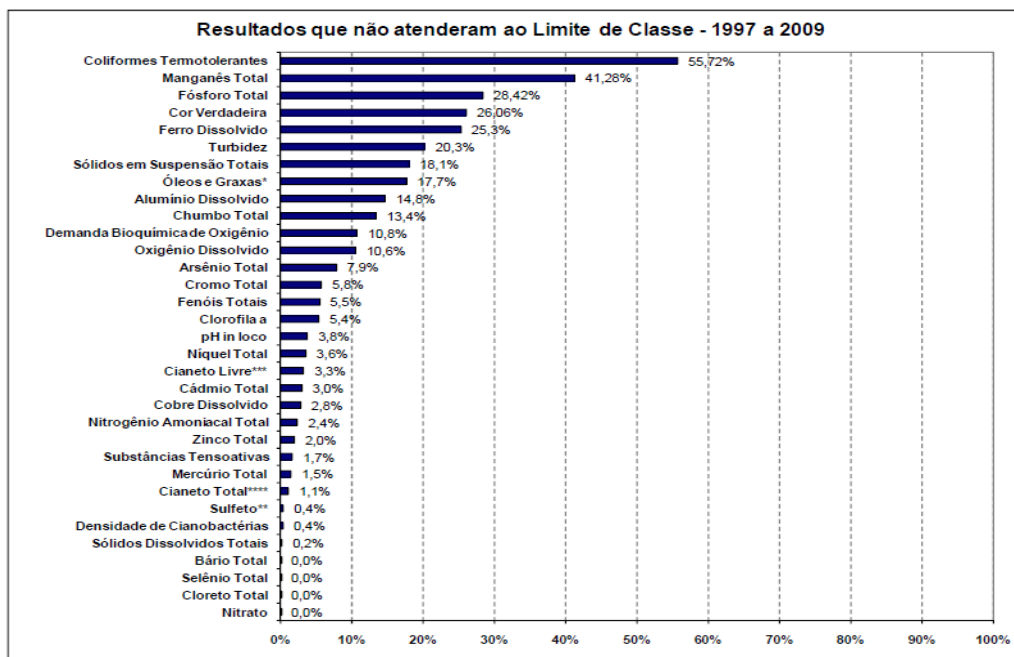
Apesar das águas dos pontos avaliados estarem localizados em áreas com concentrações elevadas de ferro e manganês no solo, os valores calculados de *background/baseline* nas águas dos pontos P35, P36 e P37, apresentaram valores abaixo do limite legal para ferro dissolvido nos três pontos e acima do limite em um dos pontos para manganês total. Também as águas do Ponto 33 mostraram reduzidas concentrações para os parâmetros avaliados.

Os pontos P07, P34 e P10, localizados no igarapé Jacarezinho, mostraram situação diferente em relação aos demais para o parâmetro Ferro dissolvido, com concentrações de *background/baseline* nas águas acima do limite legal. Para manganês total, as águas mostraram concentrações mais elevadas que o limite legal nos pontos P07 e P34.

Assim, os pontos não influenciados pelas atividades minerárias da Mina N5W, quais sejam, P33, P35, P36 e P37 apresentaram comportamento diferenciado daqueles que podem sofrer influência da atividade minerária em operação, mesmo que minimizada devido à distância e à proteção natural existente. Exceção deve ser feita ao valor para Manganês total nas águas do Ponto P36.

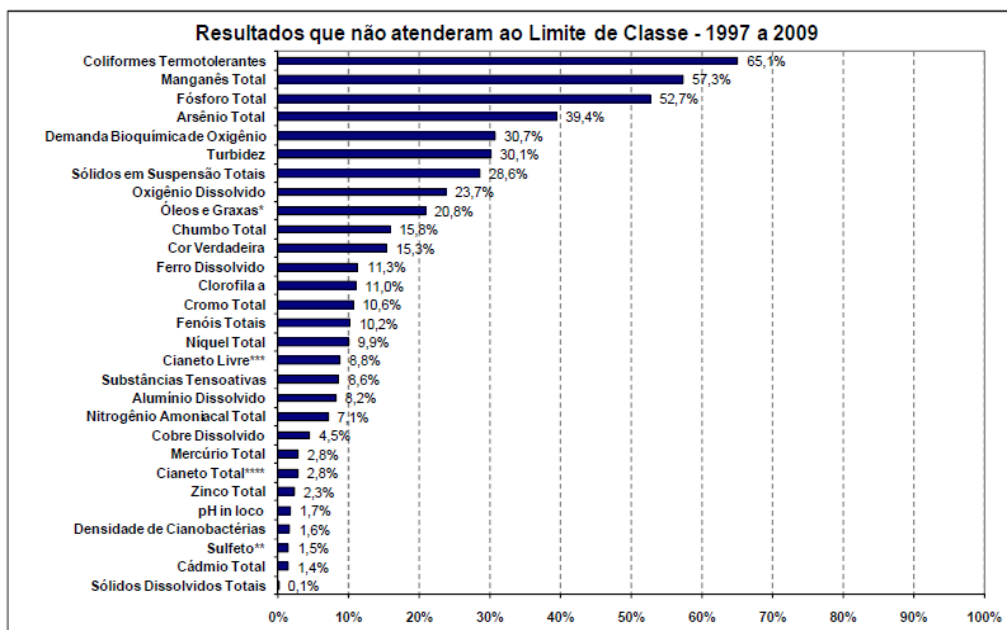
Diante do exposto, sobre as condições de disponibilização de metais para o meio hídrico, verifica-se que valores de *background* dificilmente se aplicam à áreas com interferência antrópica, a exemplo de áreas de mineração. A exposição do solo e a perda da camada orgânica acarreta a perda de capacidade de troca iônica, disponibilizando os metais para o meio hídrico. Além disto, o aumento da granulometria devido ao manejo do solo, também eleva a disponibilidade, acarretando aumento dos níveis na forma total e dissolvida dos metais. Esta constatação também se faz pertinente quando aplicado às áreas agrícolas e de intervenção para obras de infraestrutura, como estradas, loteamentos, etc.

Como exemplo ilustrativo dessa situação, apresentam-se a seguir nos gráficos das Figuras 16 a 18, mostrando a situação dos parâmetros não conformes no estado de Minas Gerais e em bacias específicas, obtidos do relatório anual do Projeto Águas de Minas de 2009, elaborado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas-IGAM. Verifica-se a ocorrência em percentuais consideráveis de alteração da qualidade das águas para os parâmetros ferro dissolvido e manganês total, em bacias com diferentes usos do solo. Nas sub-bacias do rio das Velhas e Paraopeba se fazem presentes atividades minerárias de ferro e manganês, enquanto nas bacias do rio Grande e São Francisco predominam as atividades agrícola e pecuária.



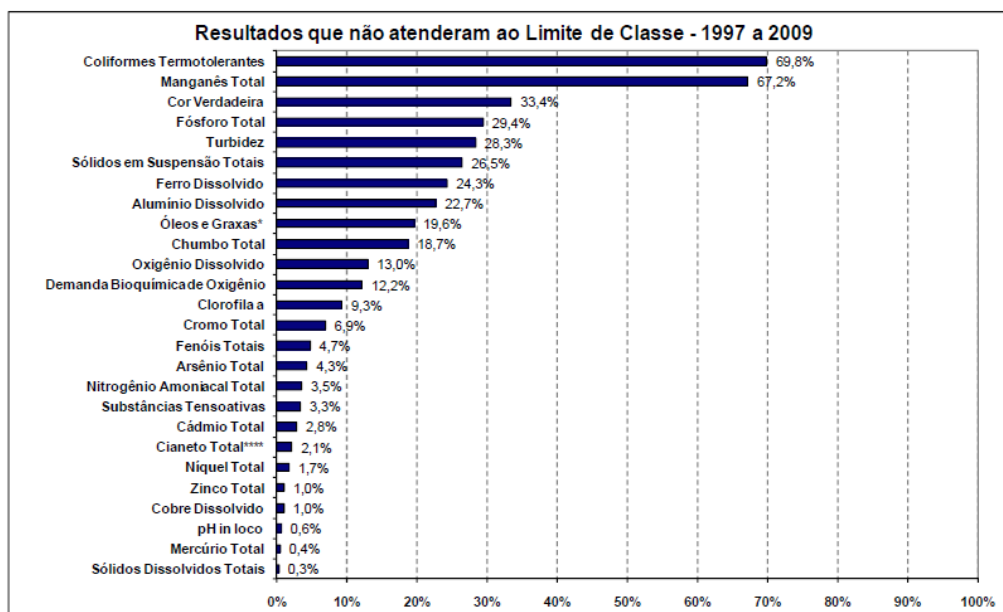
**Figura 16 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites em MG**

Fonte: IGAM (2009)



**Figura 17 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites-sub-bacia do rio das Velhas**

Fonte: IGAM (2009)



**Figura 18 - Ocorrência de parâmetros fora dos limites-sub-bacia do rio do rio Paraopeba**

Fonte: IGAM (2009)

## 5 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou um roteiro metodológico para avaliar a qualidade das águas no entorno de uma mina a céu aberto considerando todas as atividades necessárias nas principais fases de um empreendimento, iniciando na fase de planejamento da mina, se estendendo às fases de instalação e operação e, finalmente, à de descomissionamento.

Os métodos usados para avaliar a qualidade ambiental não são definidos em normas ou legislações. Assim, as metodologias usadas para avaliar a qualidade ambiental variam conforme o objetivo e não possuem um roteiro pré-estabelecido, ficando a critério dos responsáveis pela elaboração dos planos de monitoramento a definição da rede de amostragem, vinculadas ou não a um objetivo de comparar esse potencial antrópico nas diversas fases do empreendimento sobre a variável ambiental escolhida.

Durante a etapa de operação de uma mina, muitas dúvidas sobre possíveis impactos ambientais surgem por falta de metodologias que garantam o mapeamento e a identificação de condições anômalas pré-existentes, principalmente na etapa de planejamento. Os planos de monitoramento ambiental muitas vezes são aplicados sem nenhuma garantia de respostas assertivas sobre condições de qualidade diferentes das inicialmente estabelecidas.

Um fato importante nesse tipo de método é poder utilizar os mesmos critérios nas diferentes fases do empreendimento, sendo que na mudança entre as mesmas é primordial que seja feita uma análise integrada dos dados para subsidiar a retroalimentação das etapas no fluxo de ações. É uma proposta dinâmica, que não possui um fechamento em uma determinada fase e sim complementação de informações entre elas.

Estabelecer métodos de classificação da qualidade das águas na área de influência de uma mina a céu aberto pode garantir ao empreendimento minerário uma forma padronizada de sistematizar as atividades de monitoramento ambiental.

Assim, seguir a um roteiro definido e que tenha garantia da base de dados históricos se torna uma alternativa relevante e que poderá em médio e longo prazos proporcionar decisões de ajustes embasadas em uma sequência lógica de etapas.

O roteiro definido nessa tese foi aplicado na avaliação da qualidade das águas na bacia de drenagem da Mina de N5Sul, usando como partida o diagnóstico ambiental realizado na etapa de licenciamento. A definição dos passos a serem seguidos considerou a área de influência direta da mina e a rede de amostragem inicial. Foram verificados os

pontos de amostragem previamente definidos, os procedimentos de amostragem em campo, a consistência dos dados obtidos, bem como a necessidade de ajustes nessa etapa.

De modo a proporcionar a adoção de medidas de ajustes nas fases de instalação e operação, é indicado que seja realizada a análise crítica dos dados obtidos e que as mudanças nos procedimentos operacionais considere as alterações da variável ambiental. Um banco de dados consistente deve ser mantido no empreendimento com os dados de todas as fases analisadas, incluindo a análise de consistência e medidas de ajustes, de modo que seja incorporado em qualquer novo empreendimento a ser instalado.

Na mina de N5Sul pode-se considerar nos oito pontos monitorados, ao longo dos Igarapés Jacaré, Jacarezinho e Buriti, que a influência das estações chuvosas e estiagem acarretam mudanças significativas quanto a classificação dos corpos d'água. Essa variação foi observada muito fortemente no período chuvoso entre o final de 2011 e 2012, antes do início das intervenções para abertura da mina.

Quando se compara a classificação dos pontos ao que determina a legislação ambiental, verifica-se que os resultados são considerados satisfatórios em sua maioria, apresentando para os parâmetros ferro dissolvido, manganês total, oxigênio dissolvido e pH as maiores variações, tanto nos resultados obtidos na fase de planejamento da quanto na fase inicial de operação. Observa-se que essa variação já é uma condição pré-existente e que pode ser considerada naturalmente presente em uma área mineralizada e com presença de matéria orgânica oriunda do período chuvoso, influenciando na acidez e oxigenação da água.

É possível sugerir que as águas que drenam o entorno da Mina de N5Sul, tanto a montante quanto a jusante das atividades de lavra, são consideradas de classe 1 a classe 2, com pequenas variações para os parâmetros associados a condição naturalmente presente e influenciada pela sazonalidade.

Na avaliação do Índice de Qualidade da Água- IQA, tem-se índices que vão de médio a bom para a maioria dos pontos analisados, sendo os desvios relacionados a baixa oxigenação das águas e presença de coliformes termotolerantes característicos de áreas com alta riqueza de animais mamíferos de médio e grande portes.

As concentrações de oxigênio dissolvido podem sofrer depleção devido a fatores naturais, relacionados à temperaturas elevadas, à degradação da matéria orgânica e oxidação de metais. Como observado nos resultados avaliados, a presença de metais



contribui para a redução da oxigenação dos corpos de água, além da degradação da matéria orgânica. Contribui ainda para a redução da solubilidade do oxigênio na água a presença de sólidos dissolvidos e óleos. Cabe ressaltar que as águas de todos os pontos monitorados não apresentaram concentrações elevadas de sólidos dissolvidos e óleos e graxas. Mesmo com condições adequadas em relação a esses parâmetros, as águas apresentaram déficit de oxigenação. Este fato evidencia o caráter da influência de fatores naturais sobre a depleção de oxigênio dissolvido nas águas monitoradas na área da Mina de N5Sul.

Em relação ao estabelecimento de um *background/baseline* da área, considerando os limites preconizados pela Resolução CONAMA Nº 357/2005, salienta-se que os valores mais próximos das condições naturais, ou daqueles que prevalecem antes da implantação do empreendimento, mantiveram-se em sua maioria nos resultados medidos na fase inicial de operação da Mina de N5Sul e serão utilizados para estudos futuros de definição de *background/baseline* para os demais corpos ainda não explorados dentro do Complexo Minerador de Carajás.

Para melhor embasar essa discussão foi feito o acompanhamento dos resultados do monitoramento da rede proposta neste trabalho, para avaliar o período de implantação da mina até dezembro de 2012, de modo a definir os valores de *baseline*, levando-se também em consideração os resultados de *background/baseline* obtidos anteriormente às atividades de implantação. Desta forma, a avaliação foi mais abrangente em relação à ocupação da área, contando com um número mais elevado de resultados para a avaliação estatística.

Essa comparação pode sugerir que as condições de *baseline* anteriormente medidas, sofrem alteração ao longo da bacia, dependendo mais de fatores sazonais do que de impactos antrópicos da operação de lavra. Essa consideração pode ser observada quando se comparam os valores de manganês total no ponto P07, no Igarapé Buriti, que apresentou nas medições anteriores a etapa de abertura da Mina de N5Sul, valores de concentração maiores que no período da mina em operação.

Considerando todas as etapas aplicadas, o roteiro metodológico proposto foi adequado para o objetivo inicialmente proposto nessa tese, indicando que é possível reduzir custos com monitoramento ambiental, otimizar tempo em avaliações que dependem de sazonalidade climática e contribuir de modo relevante para a gestão ambiental e operacional do empreendimento.

## **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se para trabalhos futuros que a metodologia seja testada em outras variáveis ambientais tais como qualidade do ar, do solo, ruídos e vibrações.

Deve-se garantir a análise integrada dos dados obtidos ao longo das quatro fases sugeridas de modo que seja possível avaliar o impacto real da abertura de uma mina sobre a qualidade das águas. Para isso, é importante que se crie procedimento no qual o roteiro metodológico seja incorporado ao sistema de gestão ambiental.

A metodologia pode ser usada nos termos de referência dos estudos ambientais futuros de modo a otimizar custos com avaliações da matriz ambiental testada.

## REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; 1998. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research, v. 90, p.29-58.
- AMPLO ENGENHARIA E CONSULTORIA; 2009. **Estudo de Impacto Ambiental - EIA Mina N5 Sul. Diagnóstico Ambiental do Meio Físico.**V.2, 396 p.
- AMPLO ENGENHARIA E CONSULTORIA; 2010. **Estudo de Impacto Ambiental/EIA/Projeto Ferro Serra Norte - Mina N4 e N5 – Estudo Global das Ampliações. Diagnóstico Ambiental do Meio Físico.**Vol.2, Cap.8, 653 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Caderno de recursos hídricos: Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil.** 134p. Brasília, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil.** 256 p. Brasília, 2012.
- APHA; 1992. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater.** 18th Edition – Edited by Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, and Andrew D. Eaton. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Hanover Maryland, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Guide for Quality Planning and Field Implementation of a Water Quality Measurement Program:** D. 5612-94. Filadélfia, 1994.7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Planejamento de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores: NBR 9897.** Rio de Janeiro, 1987. 23p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Preservação e Técnicas de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores: NBR 9898.** Rio de Janeiro, 1987. 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares. Parte 1: Projeto e construção. NBR 15495-1.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares. Parte 2: Desenvolvimento. NBR 15495-2.** Rio de Janeiro, 2007.
- BABINSKI, M.; CHEMALE, JR. F.; VAN SCHMUS, W. R.; 1995. **The Pb/Pb Age of the Minas Supergroup Carbonate Rocks, Quadrilátero Ferrífero, Precambrian Res., v. 72, p.235-245.**
- BASÍLIO, M. S.; 2005. **Geoquímica dos Sedimentos Associados aos Minérios de Ferro da Região Leste-Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG e seu Potencial para Adsorção e Dessorção de Metais Traço.** Ouro Preto, MG.
- BAUMGARTEN, M. G. Z.; POZZA, S. A.; 2001. **Qualidade de Águas: Descrição de Parâmetros Químicos Referidos na Legislação Ambiental.** 166 p. Editora da FURG, Rio Grande, RS.

BEDNAR, A.; GARBARINO, J.; RANVILLE, J.; WILDEMAN, T.; 2002. **Preserving the Distribution of Inorganic Arsenic Species in Groundwater and Acid Mine Drainage Samples**. Environ. Sci. & Tec., v.36, p.2213-2218.

BEISIEGEL, V.R., BERNARDELLI, A.L., DRUMMOND, N.F., RUFF, A.W., and TREMAINE, J.W., 1973. **Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás**: Revista Brasileira de Geociências, v. 3, p. 215–242.

BOLLMANN, H.; 2003. **Avaliação da Qualidade das Águas em Bacias Hidrográficas Urbanas**. in: Andreoli, C. V. (Ed.). Mananciais de Abastecimento: Planejamento e Gestão. Estudo de Caso do Altíssimo Iguaçu. Curitiba: Sanepar/Finep, p. 269-315.

BORBA, R.; FIGUEIREDO, B.; RAWLINS, B.; MATSCHULLAT, J.; 2000. **Arsenic in Water and Sediment in the Iron Quadrangle, State of Minas Gerais, Brazil**. Revista Brasileira de Geociências.

BORBA, R.; FIGUEIREDO, B.; CAVALCANTI, J.; 2004. **Arsênio na Água Subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG)**. Revista da Escola de Minas.

CETEC; 2006. **Desenvolvimento de Tecnologia para Descontaminação de Áreas Degradadas pela Atividade Garimpeira, com Recuperação de Mercúrio e Ouro (Estudo de Caso – Córrego Rico/Paracatu – MG)**. Módulos I e II. Belo Horizonte, MG.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **resolução N° 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.**

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA N° 397, de 03 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4° e a Tabela X do § 5°, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA N° 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.**

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA N° 396, de 03 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.**

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA N° 430, de 13 de Maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005.**

CPRM; 2003. **Manual Técnico da Área de Geoquímica.**

CRONO ENGENHARIA, 2013. **Avaliação das condições de *background*/baseline da qualidade das águas na região da mina de N5Sul - Carajás.**

CRUZ, L.; 2002. **Avaliação Geoquímica Ambiental da Estação Ecológica do Tripuí e Adjacências, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto, MG.**

- CULLEN, W. R.; REIMER, K.J.; 1989. **Arsenic speciation in the environment**. Chem. Rev. 89, 713–764.
- CUSTÓDIO, Emílio; LLAMAS, Manoel Ramón. **Hidrologia Subterrânea**. Ediciones Omega. 1976.1157p.
- DESCHAMPS, E.; CIMINELLI, V.; LANGE, F.; MATSCHULLAT, J.; RAUE, B.; SCHMIDT, H. ; 2002. **Soil and Sediment Geochemistry of the Iron Quadrangle, Brazil: The Case of Arsenic**. J Soils & Sediments, v.2, n.4, p.216-222.
- DNPM-CPRM; 1986. **Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais**. Folha Se.23.v.c. Paracatu. Escala 1:250.000. Volume I – Texto e Mapas. Belo Horizonte, MG.
- DORR II; 1969. **Physiographic Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero**, Minas Gerais. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 614-A, USGS, 1969.110.
- DREVER, J.; 1988. **The Geochemistry of Natural Waters**. 2nd ed. 437 pp. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- DZOMBAK, D.; MOREL, F.; 1990. **Surface Complexation Modelling - Hydrous Ferric Oxide**. John Wiley, New York.
- ELEUTÉRIO, L.; 1997. **Diagnóstico da Situação Ambiental da Cabeceira da Bacia do Rio Doce, no Âmbito das Contaminações por Metais Pesados em Sedimentos de Fundo**. Ouro Preto, MG.
- FADIGAS, F. de S. et al. **Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n.3, p. 699-705, 2006.
- FENZL, N.; 1988. **Composição Química das Águas Naturais**. In: Fenzl N. Introdução à Hidrogeoquímica. Belém, UFPA, p.49-74.
- FIGUEIREDO, B.; BORBA, R.; ANGÉLICA, R.; 2007. **Arsenic Occurrence in Brazil and Human Exposure**. Environ Geochem Health. v. 29, p.109-118.
- GALUSZKA, A. **Methods of determining geochemical background in environmental studies. Problems of landscape ecology**. Polish association of landscape ecology- Warsaw (in Polish with English summary), v. 16, n. 1, p. 507-519, 2006.
- GALUSZKA, A. **A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland**. Environmental Geology, v. 52, p. 861-870, 2007a.
- GALUSZKA, A. **Different approaches in using and understanding the term “Geochemical Background”- practical implications for environmental studies**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 16, n. 3, p. 389-395, 2007b.
- GOLDER ASSOCIATES. **Estudos técnicos para a proposição de plano de amostragem de águas superficiais e subterrâneas naturais e sedimentos de corrente para a avaliação de concentrações de background geoquímico de elementos químicos nas regiões das minas de ferro da Vale no quadrilátero ferrífero**. Relatórios Temáticos- RT-004\_089-515-5011\_01-J, v.1, 141 p. 2010.
- GOUGH, L.P. **Understanding our fragile environment**. Lessons from geochemical studies. *United States Geological Survey Circular*, v. 1105, p. 1-34, 1993.

GUIA INTERNET BRASIL; 2009. **Mapa climático do Brasil**. Guia cidades. Brasil Clima. <http://www.guianet.com.br/brasil/mapaclima.htm>.

HAWKES, H. E.; WEBB, J. S.; 1962. **Geochemistry in Mineral Exploration**. New York, Harper & Row. 415 p.

HEINECK, C. A.; BRANDALISE, L. A.; 1982. Considerações Geológico-Geoquímicas sobre a região de Vazante, Minas Gerais. In: Anais do 32.º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. SBGQ. V. 5, 2016-2021.

HEM, J. D.; 1970. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters**. U.S. Government Printing Office, Washington. 363pp.

HEM, J.D. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water**. 2. ed. Geological Survey Water Supply Paper 1473. Washington, 1975. 363p.

HEM, J. D.; 1985. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water**. Washington, D.C., USGS Water-Supply Paper 2254.

HOWARD, P. H.; BOETHLING, R. S.; JARVIS, W. F.; MEYLAN, W. M.; MICHALENKO, E. M.; 1991. **Handbook of Environmental Degradation Rates**. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan, USA.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. **Monitoramento da Qualidade das águas Superficiais da Bacia do Rio Grande em 2009**. Relatório Anual. Belo Horizonte, Dezembro de 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Statistical Interpretation of Test Results – Estimation of the mean – Confidence interval: ISO 2602**. 2ª ed. Suíça, 1980. 5p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Water Quality – Sampling – Part 2: Guidance on Sampling Techniques: ISO 5667-1**. 2ª ed. Suíça, 1991. 9p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Water Quality – Sampling – Part 20: Guidance on the use of sampling data for decision making – Compliance with thresholds and classification systems, ISO 5667-20**. 1ª ed. Suíça, 2008. 33p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Water Quality – Sampling – Part 3: Guidance on the preservation and handling of samples, ISO 5667-3**. 3ª ed. Switzerland, 2003. 26p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Water Quality – Sampling – Part 1: Guidance on the Design of sampling programmes and sampling techniques, ISO 5667-1**. 1ª ed. Suíça, 2006. 31p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Water Quality – Sampling – Part 11: Guidance on Sampling of groundwater, ISO 5667-11**. 2ª ed. Suíça, 2009. 26p.

JOINT ORE RESERVES COMMITTEE OF THE AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, AUSTRALIAN INSTITUTE OF GEOSCIENTISTS AND MINERALS COUNCIL OF AUSTRALIA (JORC); 1999. **Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code)**.

KEITH, Lawrence H. **Principles of Environmental Sampling**. 2. ed. Washington: ACS Professional Reference Book, 1996. 848p.

LANGMUIR, D.; 1997. **Aqueous environmental geochemistry**. 600 pp. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

LEVINSON, A. A.; 1974. **Introduction to Exploration Geochemistry**. Calgary Applied Publishing Ltda, 612 p.

LINS, C. A. C.; 2003. **Manual técnico da área de geoquímica – versão 5.0**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 77pp.

MACAMBIRA, J.B., and SILVA, V.F., 1995. **Estudo petrológico, mineralógico e caracterização das estruturas sedimentares e diagenéticas preservadas na Formação Carajás, Estado do Pará**: Boletim Museu Para. Emílio Goeldi, Série Ciência da Terra, v. 7, p. 363–387.

MACHADO, N.; CARNEIRO, M. A.; 1992. **U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil**. Canadian Journal of Earth Science, v. 29, p. 2341-2346.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C. M.; GAULTIER, G.; 1996. **Ages of detrital zircon from Archean-Paleozoic: Implications for Greenstone Belt setting an evolution of a Transamazonian foreland basin. Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil**. Earth and Planetary Science Letters, n. 41, p.259-276.

MANAHAN, S.E. **Environmental Chemistry**. 7. ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 898 p.

MARQUES, F. B. ; BATELOCHI, M. A. ; MÖLLER, J. C. ; 1996. **Geologia, Mineralização e Lavra do Quadrilátero Ferrífero – Paracatu, MG**. In: XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Volume 7.

MATSCHULLAT, J., OTTENSTEIN, R., REIMANN, C. **Geochemical background - can we calculate it?**. Environmental Geology, v. 39, p. 990-1000, 2000a.

MCCUTCHEON, S. C.; MARTIN, J. L.; BARNWELL JR., T. O.; 1993. **Water quality**. In: Maidment D.R. (Ed). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, Inc., USA, 11.1-11.73.

MCNEELY, R. N.; NEIMANIS, V. P.; DWYER, L.; 1979. **Water Quality Sourcebook – A guide to Water Quality Parameters**. Inland Waters Directorate – Water Quality Branch, Ottawa, Canada.

MDGEO, 2006. **Relatório do modelo numérico regional do fluxo d'água subterrânea das minas de ferro N4 e N5 de Carajás (PA)**. Julho de 2006.

MDGEO, 2010. **Relatório do modelo numérico regional do fluxo d'água subterrânea das minas de ferro N4 e N5 de Carajás (PA)**. Dezembro de 2010.

MEIRELLES, M.R., 1986, **Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará**: Unpublished M.Sc. dissertation, Brasília, Brazil, Universidade de Brasília, 171 p.

MEIRELLES, M.R., and DARDENNE, M.A., 1991. **Vulcanismo basáltico de afinidade shonshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão Pará, Serra**

**dos Carajás, Pará [ext. abs.]:** Congresso Brasileiro de Geoquímica, 4th, Proceedings, p. 131–132.

MELLO, J. W. V.; ROY, W. R.; TALLBOTT, J. L.; STUCKI, J. W.; 2005. **Mineralogy and Arsenic Mobility in Arsenic-rich Brazilian Soils and Sediments.** J Soils & Sediments.

MEYBECK, M.; HELMER, R.; 1996 Introduction. In: D. Chapman [Ed.] **Water Quality Assessments.** A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. 2nd edition. Chapman & Hall, London.

MÖLLER, J. C.; BATELOCHI, M. A.; 1995. **Pesquisa de Ouro na Faixa Brasília.**

MOORE, J. N.; FICKLIN, W. H.; JOHNS, C.; 1988. **Partitioning of arsenic and metals in reducing sulfidic sediments.** Environ. Sci. Technol. 22, 432 – 437.

MOURÃO, M. A. A.; 2007. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte, MG.

NOCE, C. M.; 1995. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 128p.

NIMER, E.; 1989. **Climatologia do Brasil.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil.

O'DAY, P. A.; 2006. **Chemistry and Mineralogy of Arsenic.** Elements, Vol. 2, p. 77-83. Abril de 2006.

OLIVEIRA et al.; 1979. **Projeto Geoquímica do Quadrilátero Ferrífero.**

PIMENTEL, H. S.; LENA, J. C.; NALINI JR, H. A.; 2003. **Studies of water quality in the Ouro Preto Region, Minas Gerais, Brazil: The release of arsenic to the hydrological system.** Environmental Geology, v.43, p.725-730.

PLUMLEE, G.S. **The environmental geology of mineral deposits.** In: PLUMLEE, G.S., LOGSDON, J.J. (eds.). The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A, Processes, Techniques, and Health Issues. *Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology*, v. 6A, p. 71-116, 1999.

RAPOSO, F. O.; LADEIRA, E.; 1995. **Padrões de terras-raras de algumas formações ferríferas arqueanas do QF.** A Terra em Revista, 1(0): 19-23.

RAWLINS, B. G.; WILLIAMS, T. M.; BREWARD, N.; FERPOZZI, L.; FIGUEIREDO, B. F.; BORBA, R. P.; 1997. **Preliminary investigation of mining-related arsenic contamination in the provinces of Mendoza and San Juan (Argentina) and Minas Gerais State (Brazil).** London: British Geological Survey. 25p. (Technical Report WC /97/60).

REIMANN, C., FILZMOSE, P., GARRETT, R.G.. **Background and threshold: critical comparison of methods of determination.** Science of the Total Environment, v. 346, p. 1- 16, 2005.

REIMANN, C.; GARRETT, R.G.; 2005. **Geochemical background – concept and reality.** Science of the total environment. 350 (2005) 12-7.

REYNOLDS, I. M.; 2000. **Mineralogical Characterisation of Gold and Electrum Particles in Four Ore Samples from the Quadrilátero Ferrífero Mine, Brazil.** Rio Tinto Technical Services Development Group. Bristol, Inglaterra.



ROBINSON, G. R. J. ; AYOTTE, J. D.; 2006. **The influence of geology and land use on arsenic in stream sediments and ground waters in New England, USA.** Applied Geochemistry, 21 1482-1497.

RODRIGUES, A.S. L; NALINI JÚNIOR,A.N.; 2009. **Valores de *background* geoquímico e suas implicações em estudos ambientais.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(2): 155-165, abr. jun. 2009.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; QUADE, H.; 1993. **Análise microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero: texturas desenvolvidas e um modelo para sua origem.** In: Workshop Geologia Estrutural dos Minérios de Ferro, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: SBG - Núcleo Minas Gerais, p. 362-366.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; 2000. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão.** Geonomos, 8(2):27-43.

SANTOS, J.O.S., 200. **Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central,** in Bizzi L.A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI R.M., GONÇALVES J.H., eds., Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais–CPRM, p. 169–226.

SIAL A.N.; COSTA M.L.; MACAMBIRA J.; GUEDES S.C. 1999. **Isótopos de carbono e oxigênio em carbonatos de BIFs de testemunhos de sondagem na Serra dos Carajás, Amazônia, Brasil.** In: SBG, Simpósio da Geologia da Amazônia, 6, Manaus, Boletim de Resumos Expandidos, 1: 335-338.

SILVA, A. M.; CHEMALE JR., F.; KUYUMJIAN, R. M.; HEAMAN., L.; 1995. **Mafic dike swarms of Quadrilátero Ferrífero and southern Espinhaço, Minas Gerais, Brazil.** Rev. Bras. Geoc., 25(2):124-137.

SILVA, F. H.; 1996. **Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro, Paracatu, MG.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, D.F.

SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G.; 2002. **A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters.** Applied Geochemistry, Vol. 17, p. 517-568.

STUMM, W.; MORGAN, J. J.; 1996. **Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters,** 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1022p.

SZIKSZAY, Maria. **Geoquímica das águas.** Bol. IG-USP, Sér. didát., São Paulo, n. 5, nov. 1993.

TOLBERT, G.E.; TREMAINE, J.W.; MELCHER, G.C., and GOMES, C.B., 1971. **The recently discovered Serra dos Carajás iron ore deposits, northern Brazil:** Economic Geology, v. 7, p. 985–994.

TUCCI, C. E. M.; 2002. **Água no meio urbano.** In: Rebouças, A.; Braga, B.; Tundisi, J. G.;Uso e conservação. 2. ed. São Paulo: Academia Brasileira de Ciências, Instituto de Estudos Avançados, USP, p. 473-506.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEITO, O. M.; 2001. **Gestão da água no Brasil.** Brasília: UNESCO, 2001. 192 p.

TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H.; 1961. **Distribution of elements in some major units of the earth's crust.** Geol. Soc. Of Am. Bull. 72:175-192.

UNEP/WHO. **Water Quality Monitoring – A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes: Chapter 3 – Designing a Monitoring Programme.** 1996. 22p.

UNEP/WHO. **Water Quality Monitoring – A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes: Chapter 9 – Analytical Quality Assurance.** 1996. 18p.

UNESCO/WHO/UNEP. **Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring: Chapter 2 – Strategies for Water Quality Assessment.** 2. ed. 1992. 31p

UNESCO/WHO/UNEP. **Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring: Chapter 3 – Selection of Water Quality Variables.** 2. ed. 1992. 54p.

UNESCO/WHO/UNEP. **Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring: Chapter 9 – Groundwater.** 2. ed. 1992. 68p.

VASCONCELOS, F. M.; CIMINELLI, V. S. T.; OLIVEIRA, R. P.; SILVA, R. J.; 2005. **Determinação da especiação química e potencial de mobilidade do arsênio em sítios de mineração.** Geoquímica Brasiliense.

VASCONCELOS, F. M.; TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.; 2009. **Avaliação da qualidade de águas, base tecnológica para a gestão ambiental.** SMEA, 323 p.

VAUGHAN, D. J., 2006. **Arsenic Elements**, Vol. 2, p. 71-75.

VON SPERLING, M.; 1995. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Editora do Depto. de Eng. Sanitária UFMG, 243 p.

WEDEPOHL, K. H.; 1978. **Handbook of Geochemistry.** Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, v.II/1,2,3,4,5.

WERNER S.; JAMES J. M.. **Aquatic Chemistry.** 3 ed. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1996.1022 p.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Tabelas de 1 a 8 com os resultados analíticos para a rede de amostragem













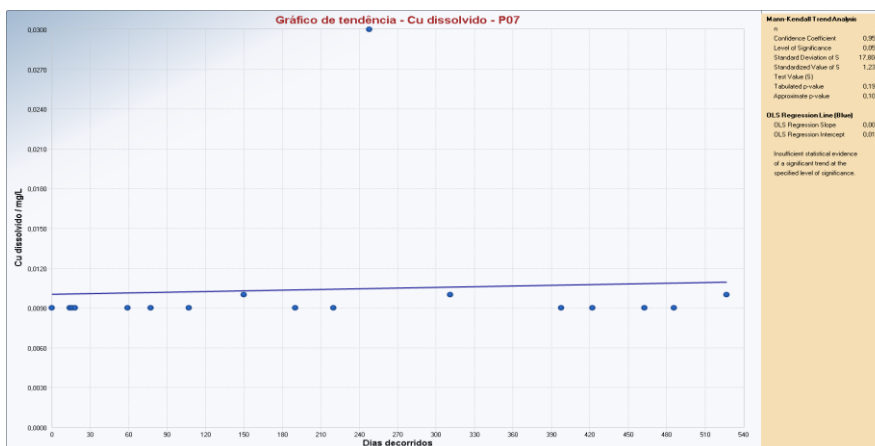
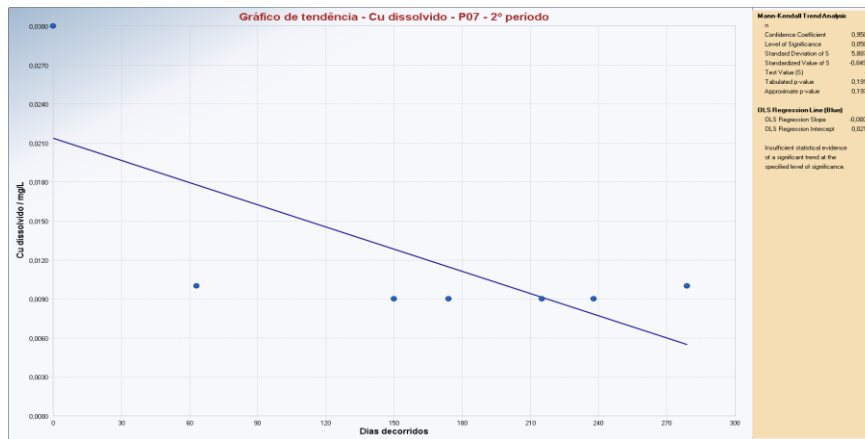
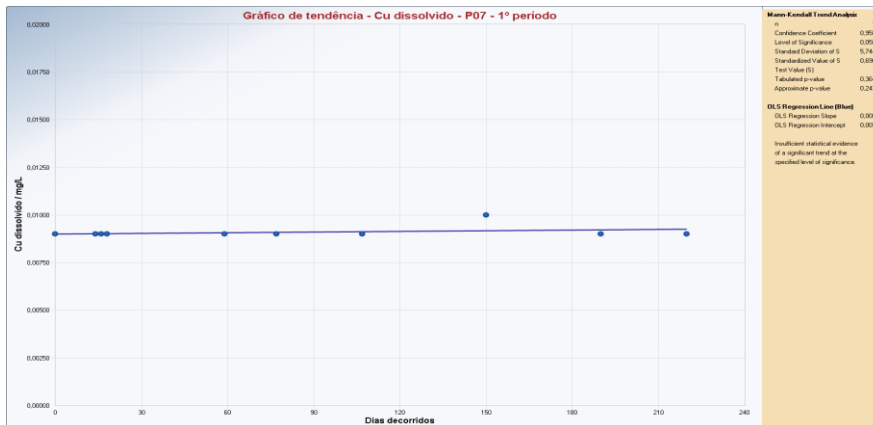




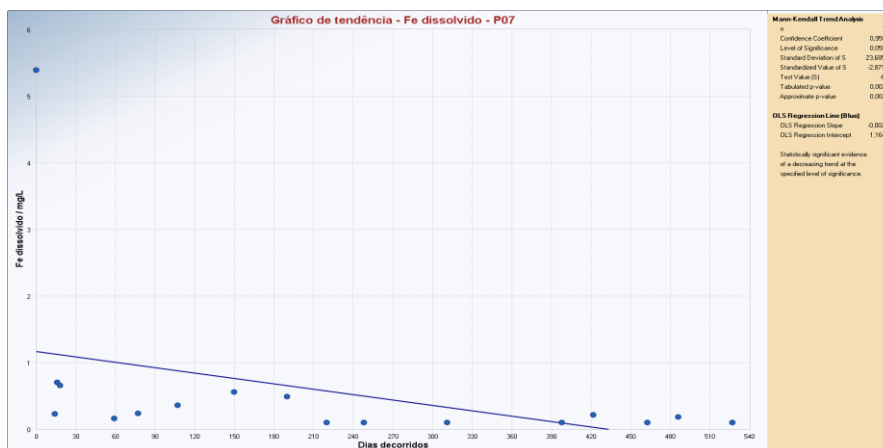
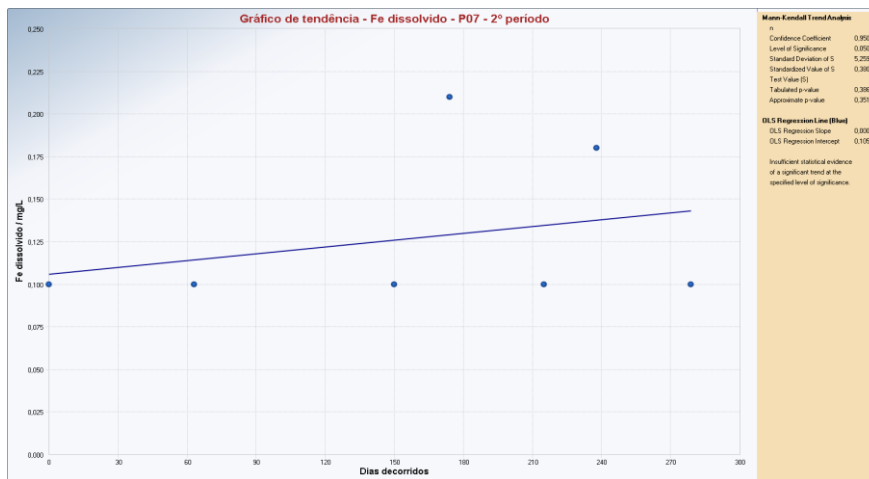
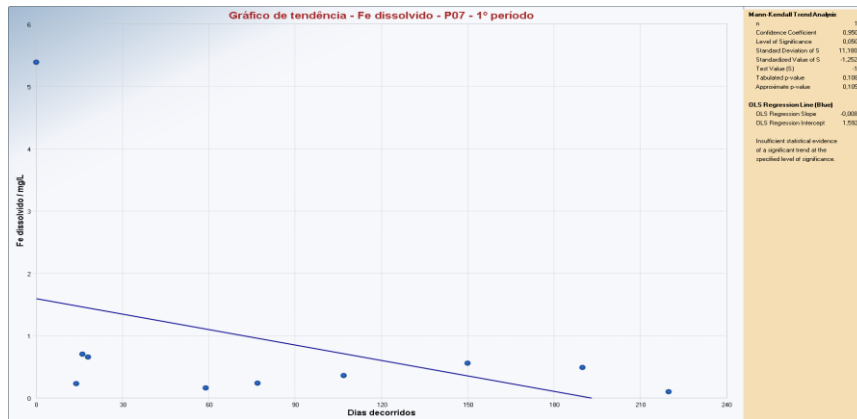
## APÊNDICE B

Trend Test Parâmetros Ponto P07 a P37

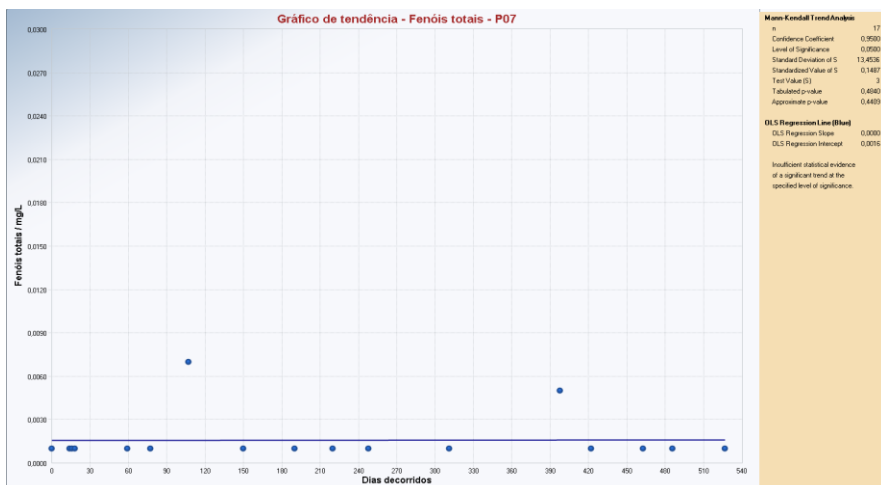
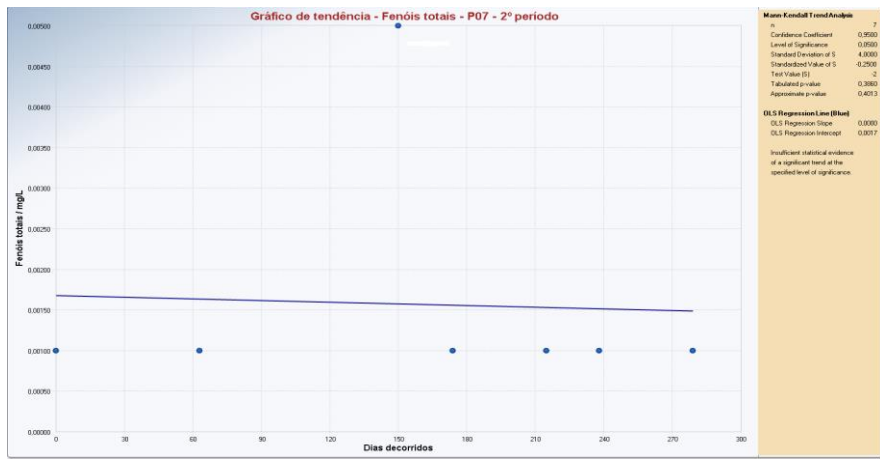
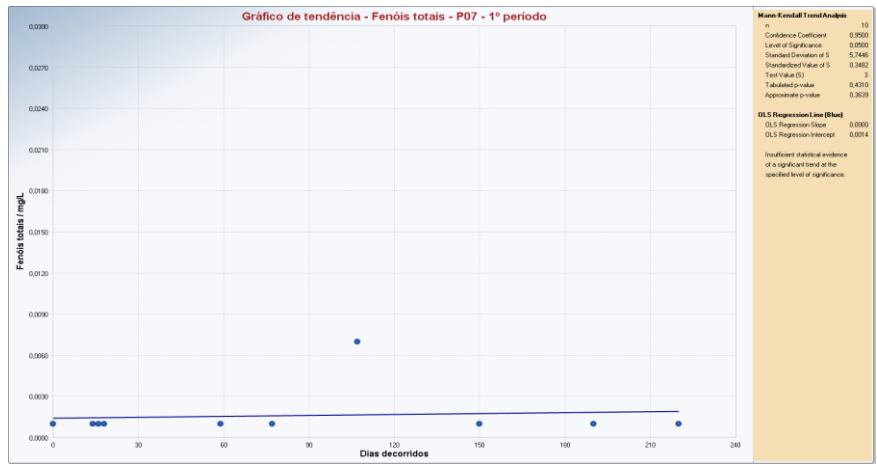
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P07



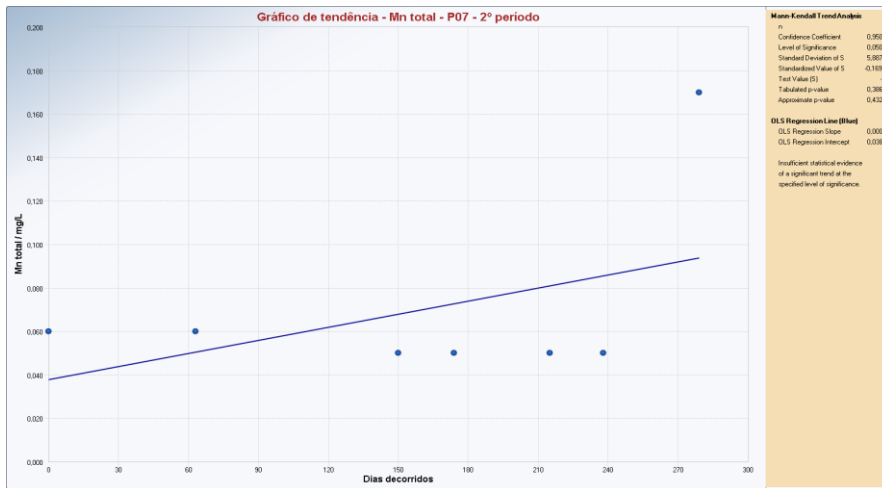
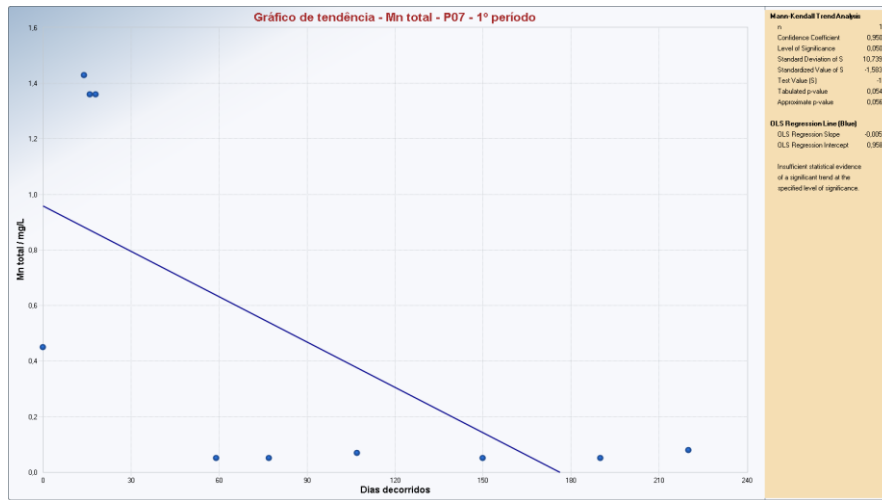
## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P07



## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P07

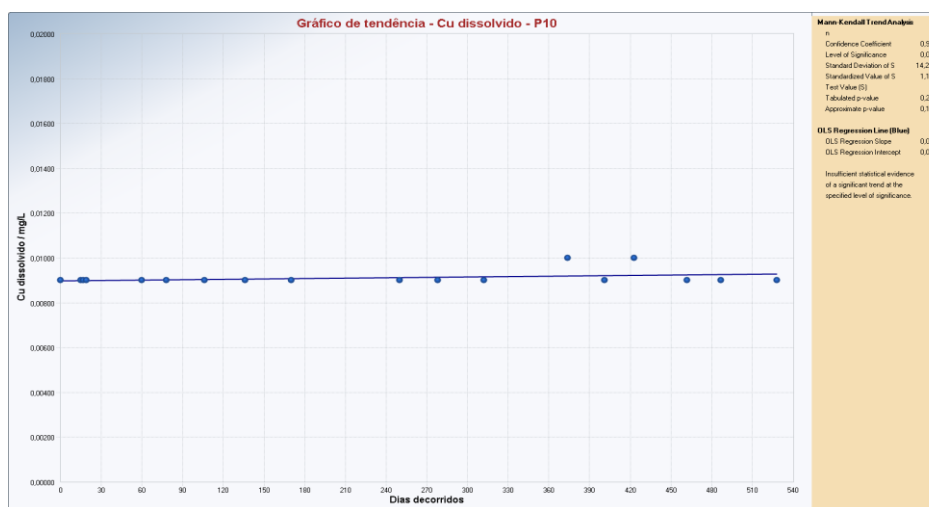
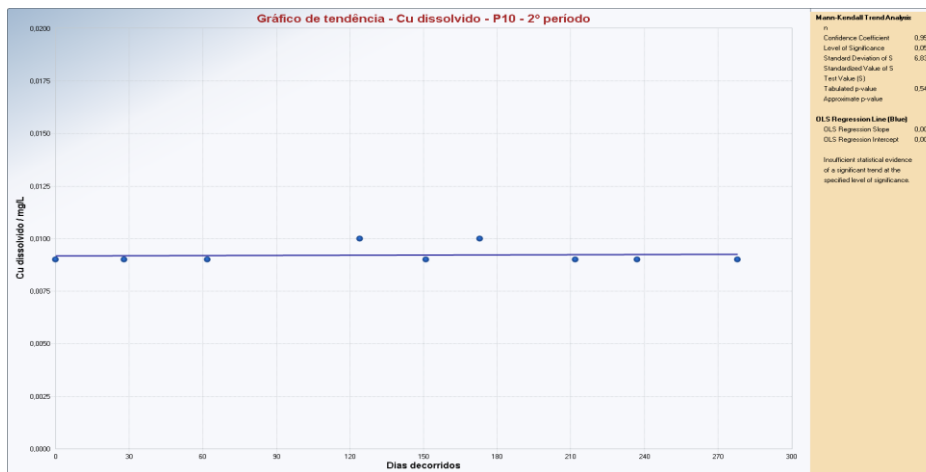
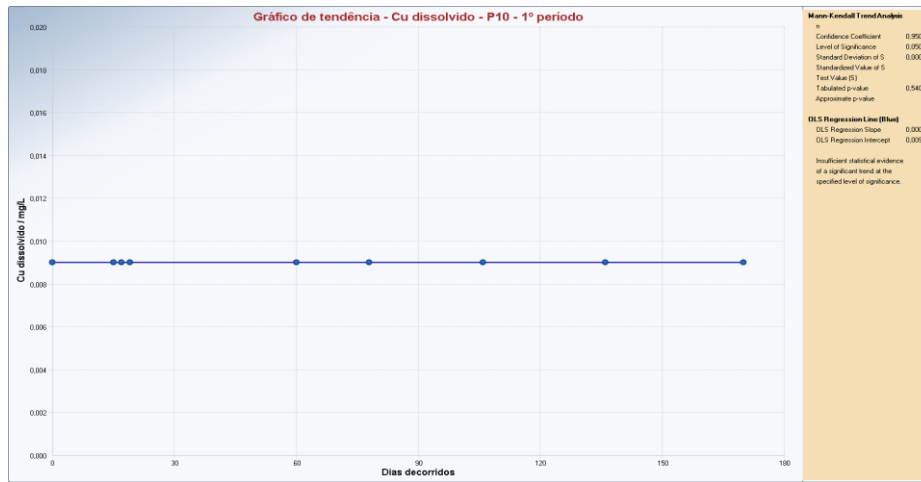


## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P07

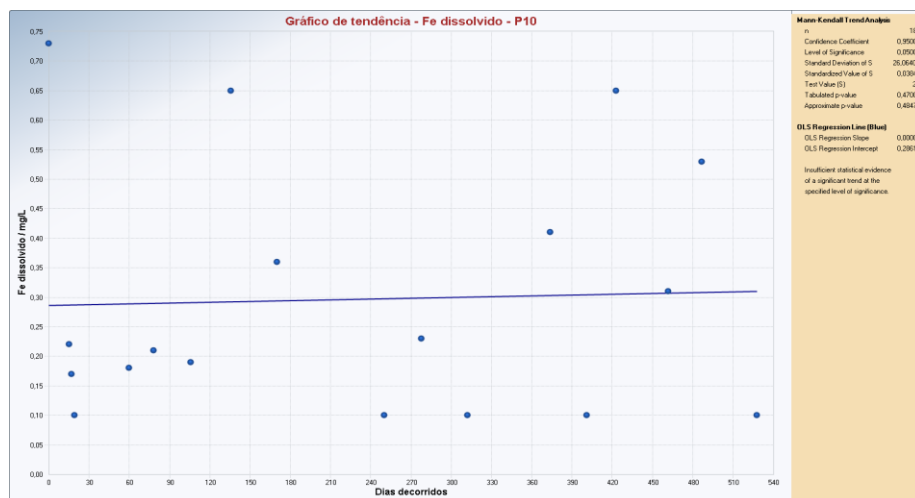
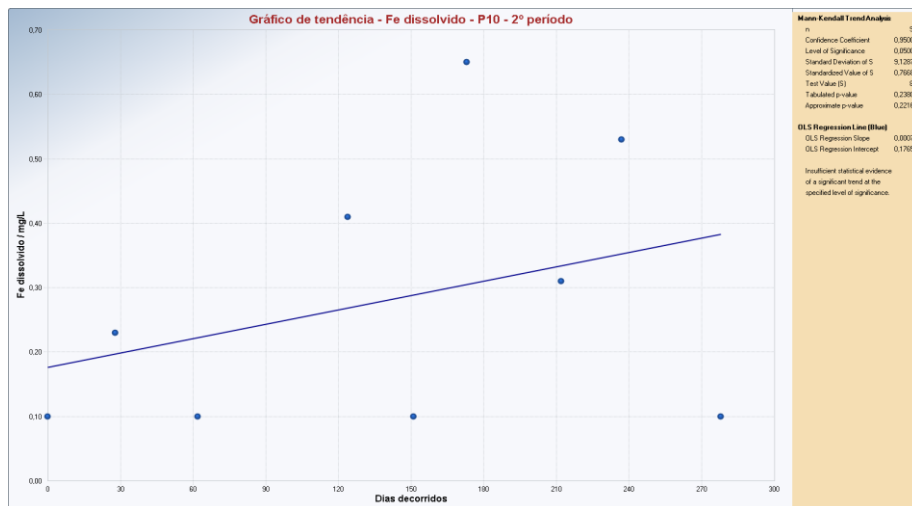
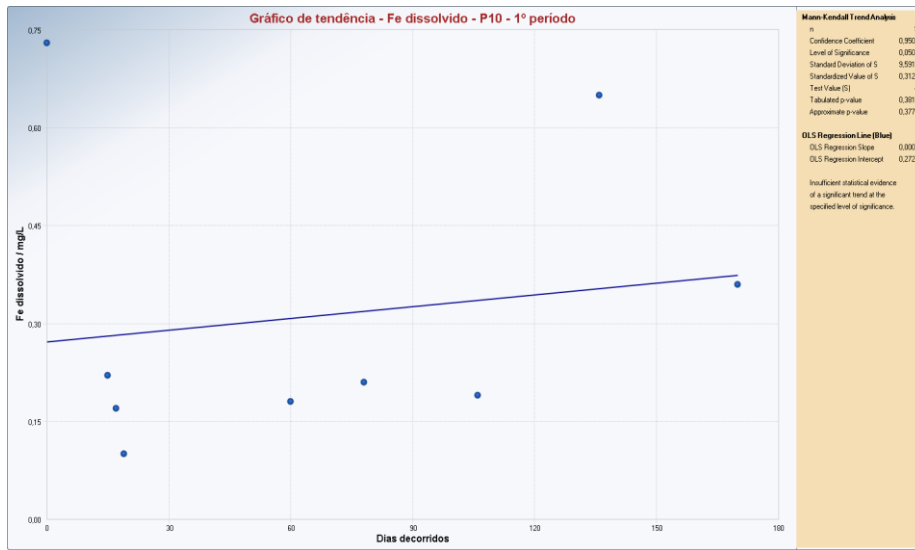




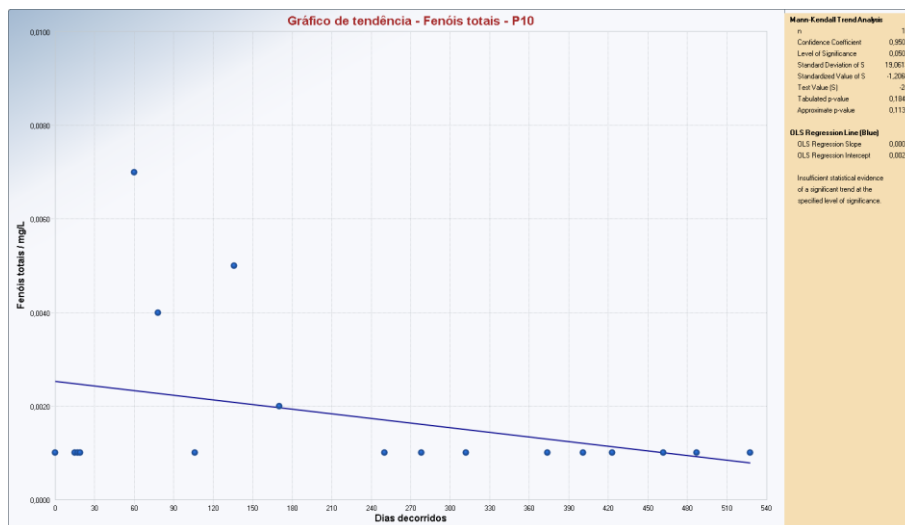
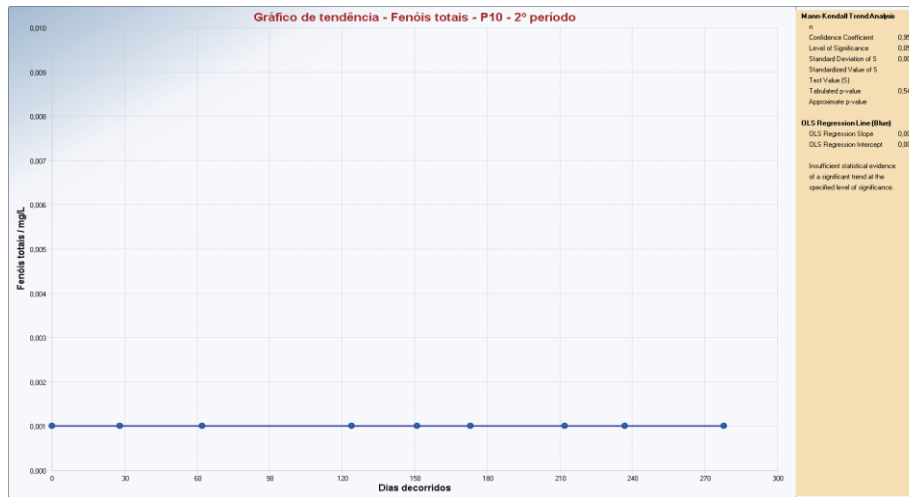
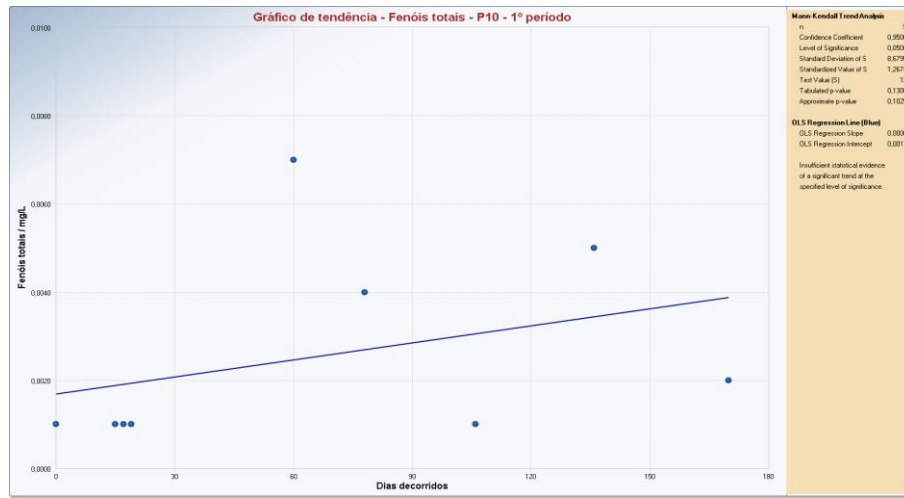
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P10



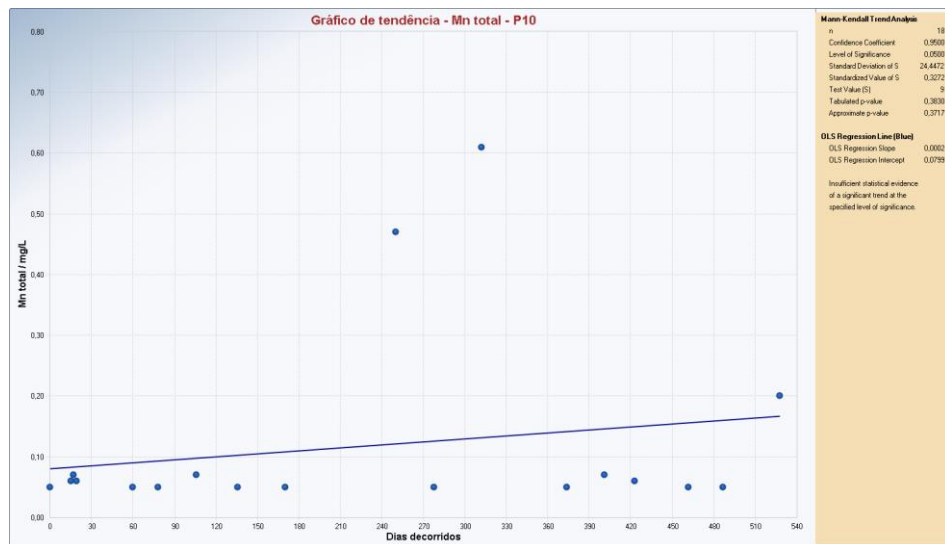
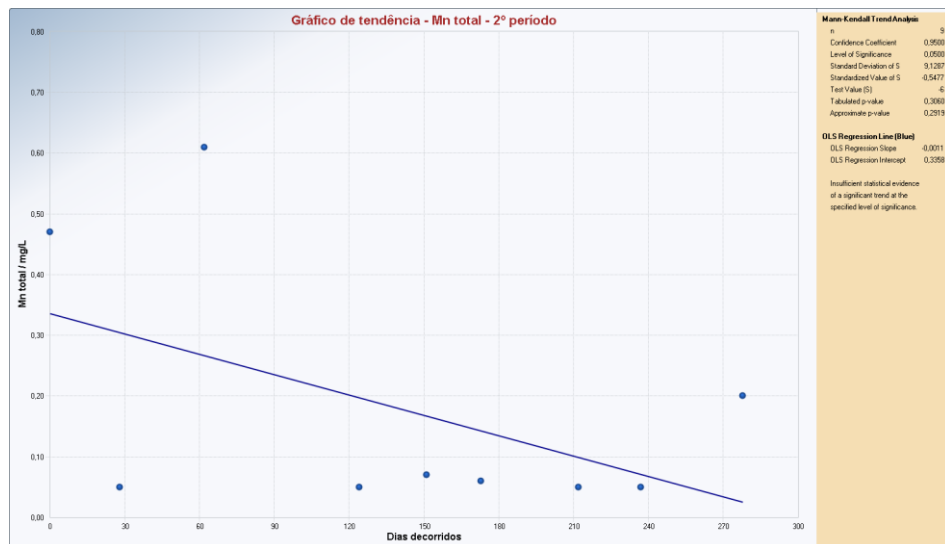
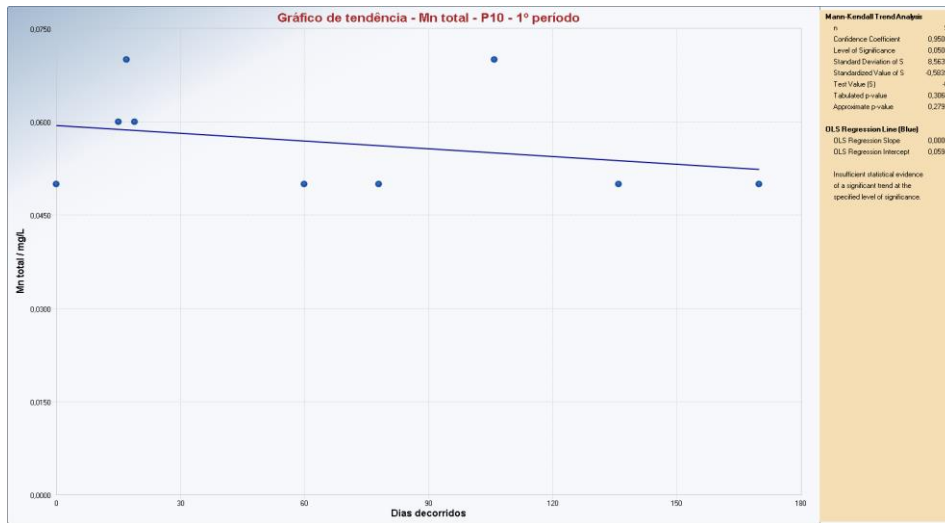
## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P10



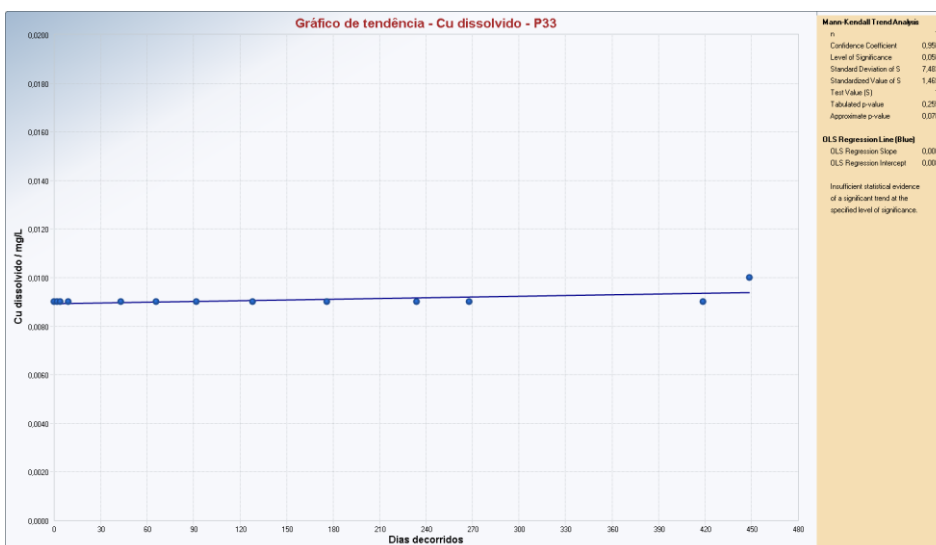
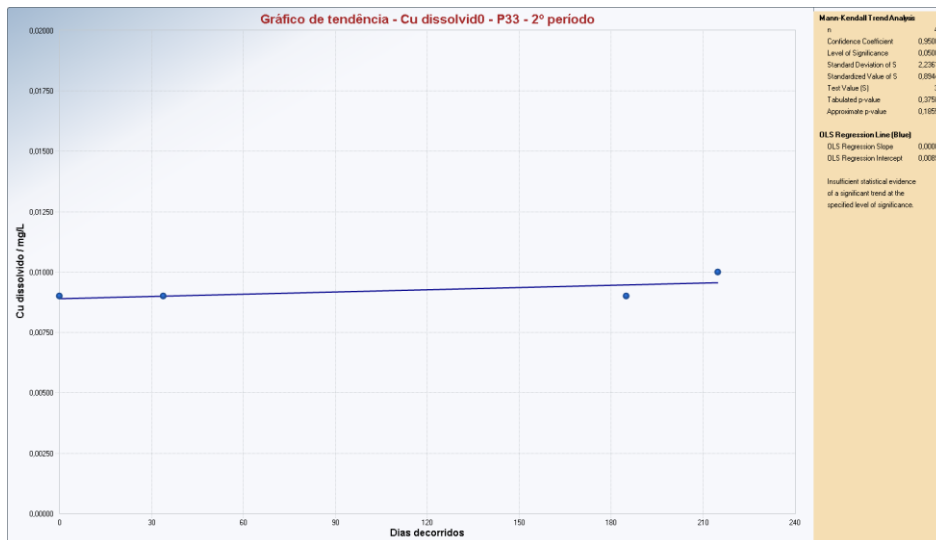
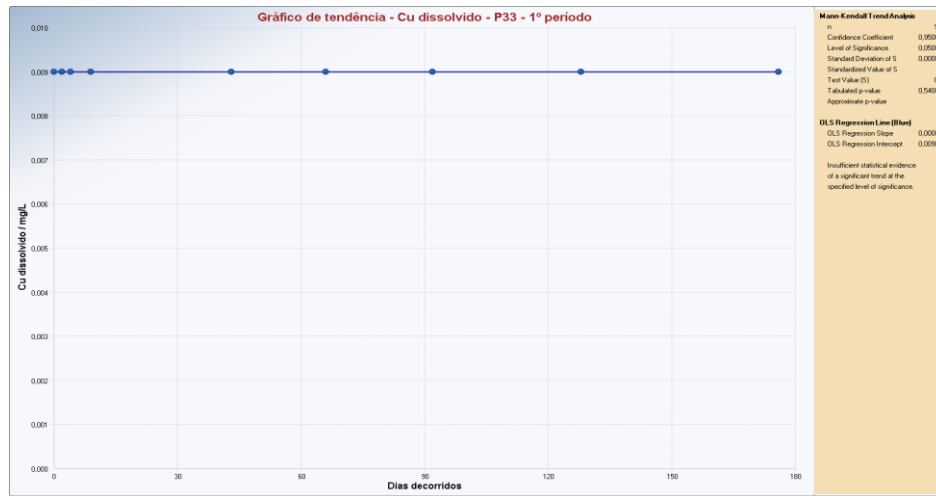
## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P10



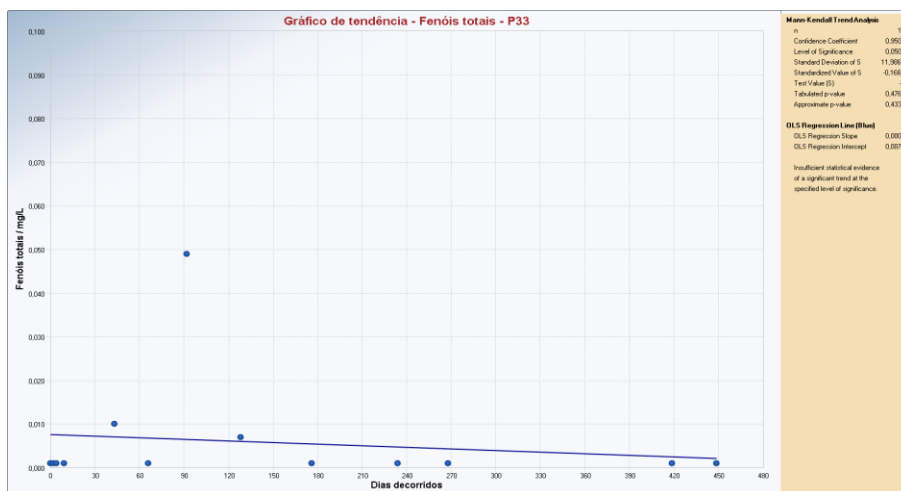
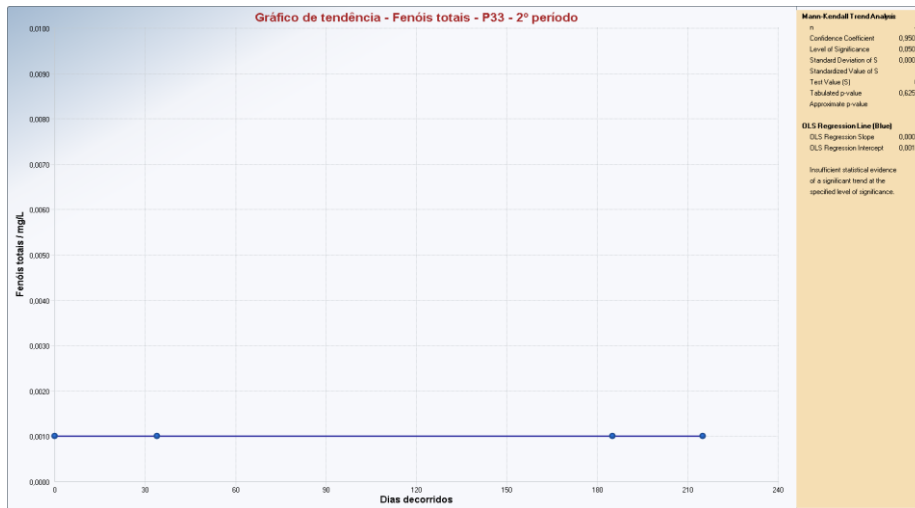
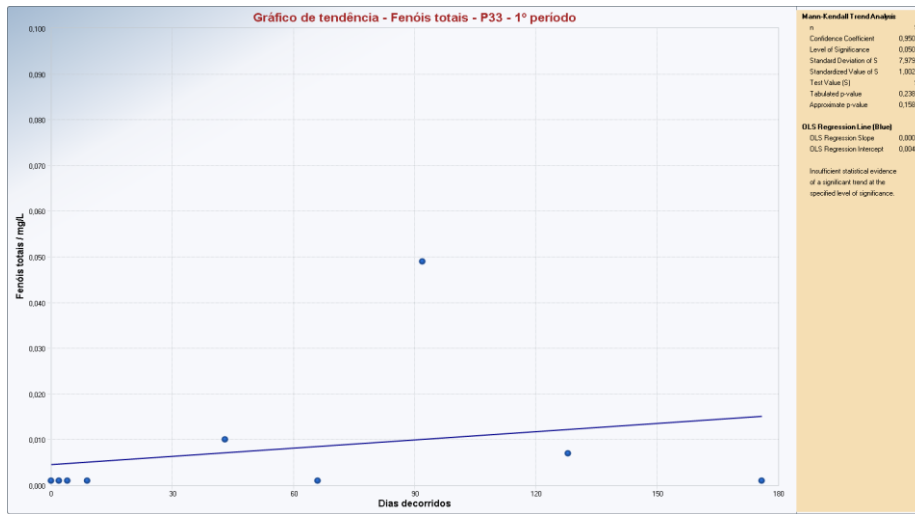
## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P10



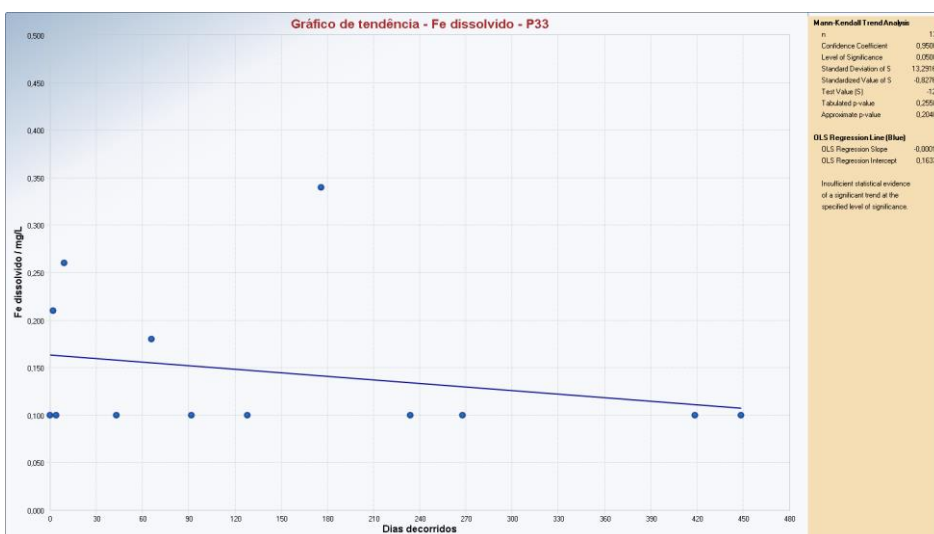
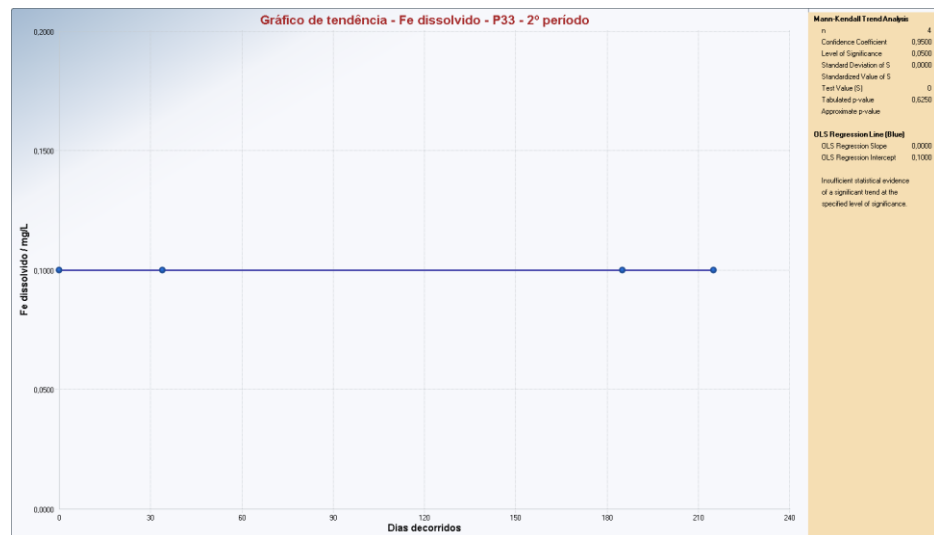
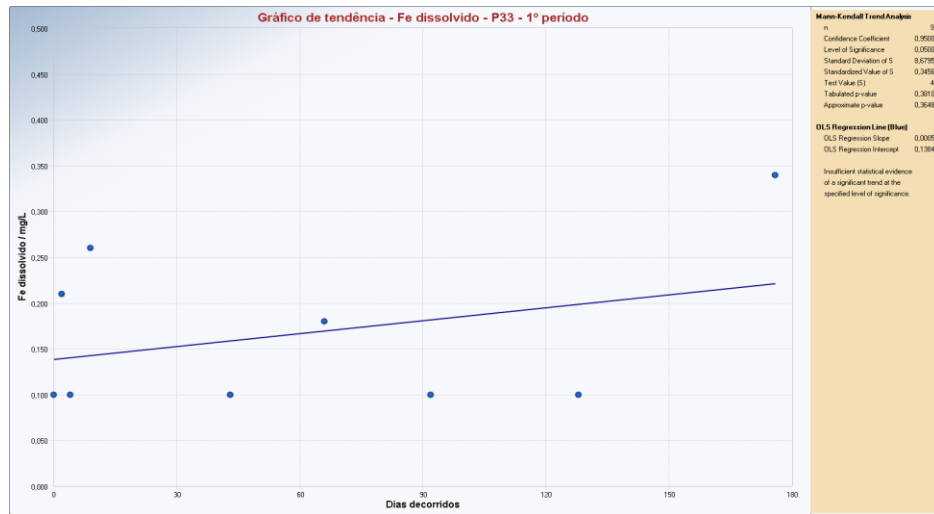
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P33



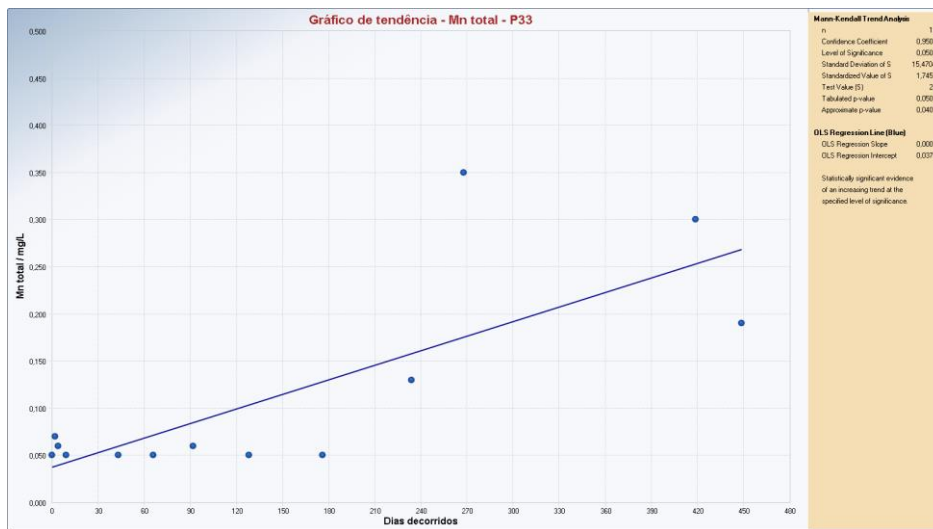
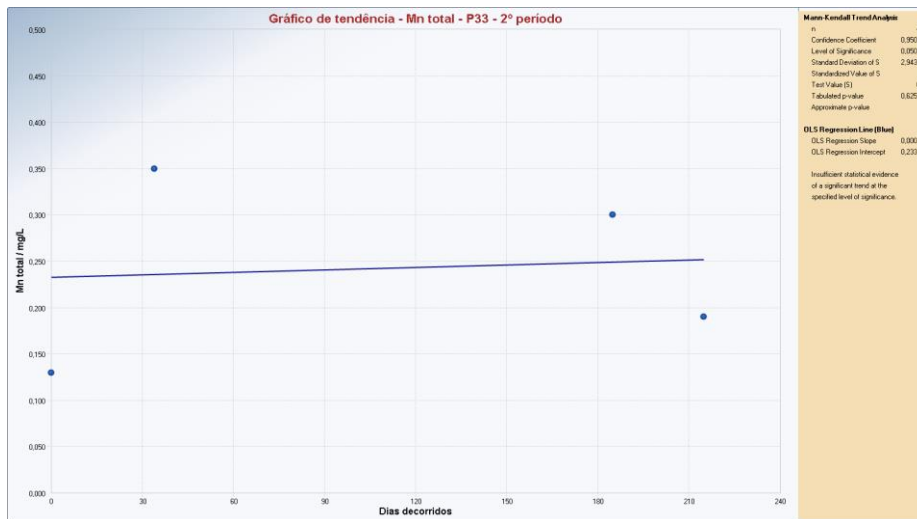
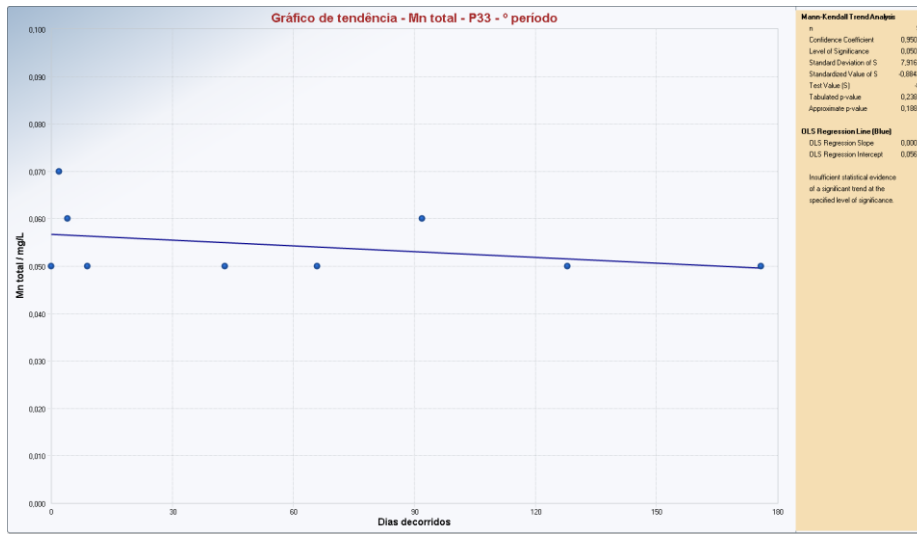
## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P33



## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P33

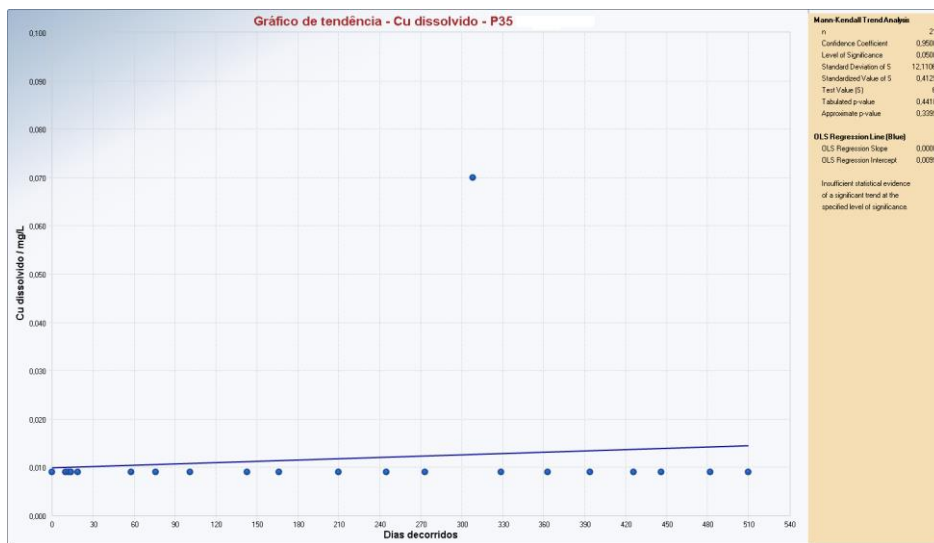
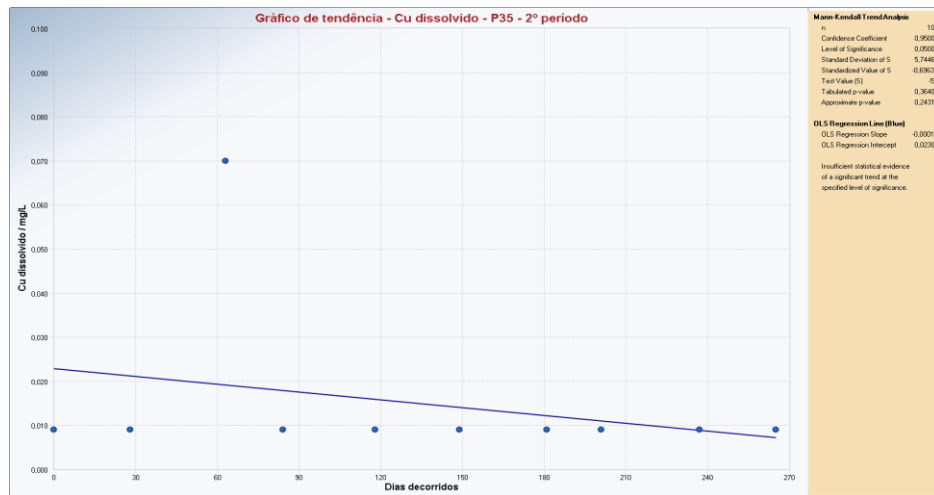
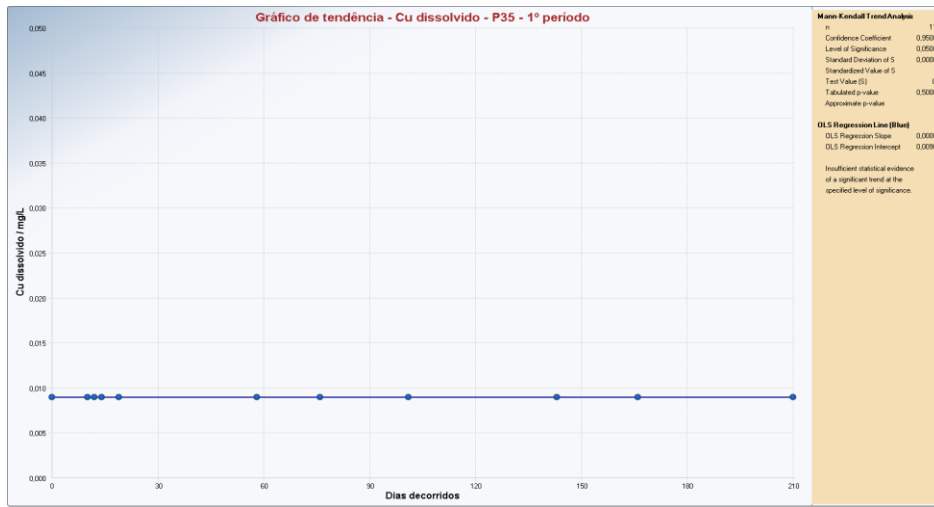


## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P33

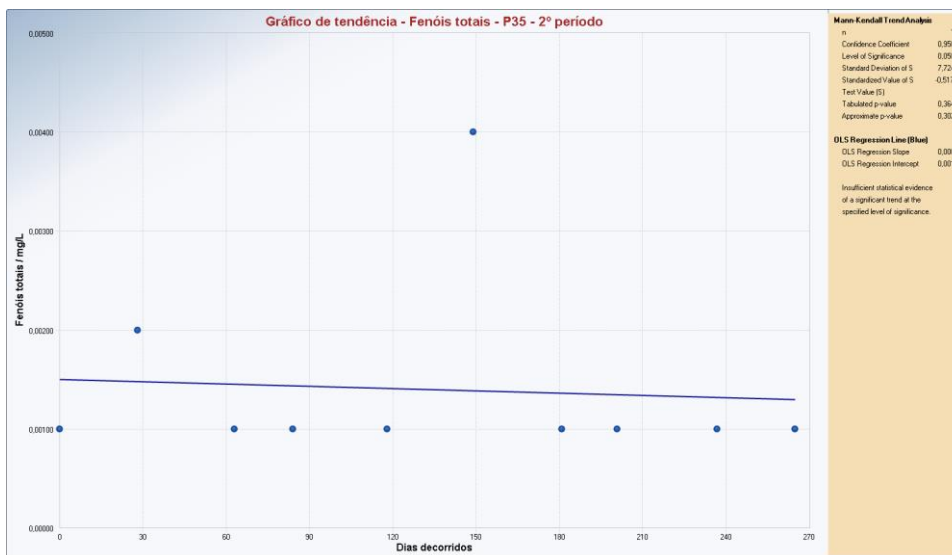
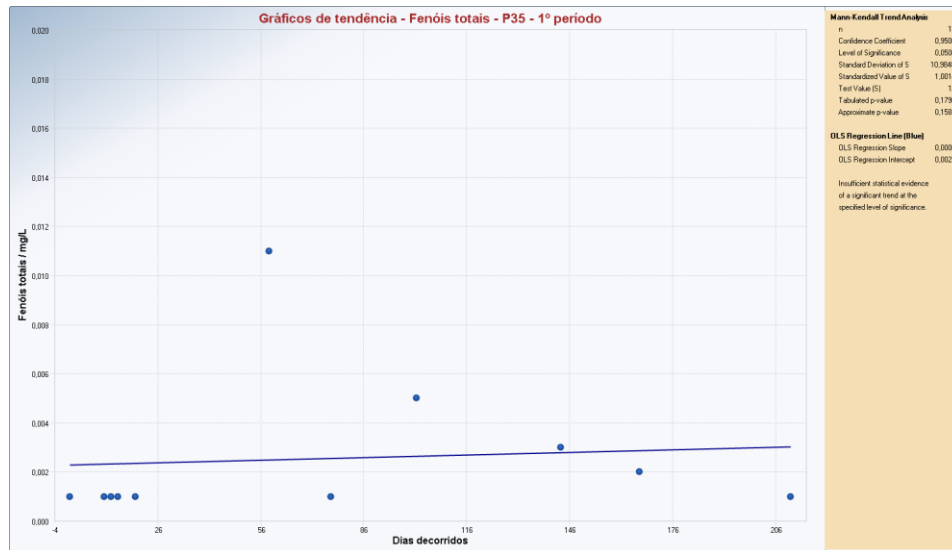




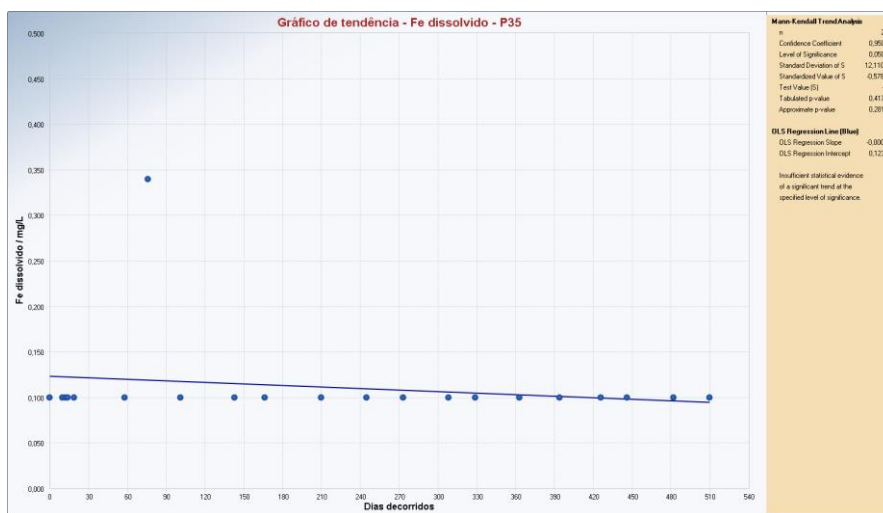
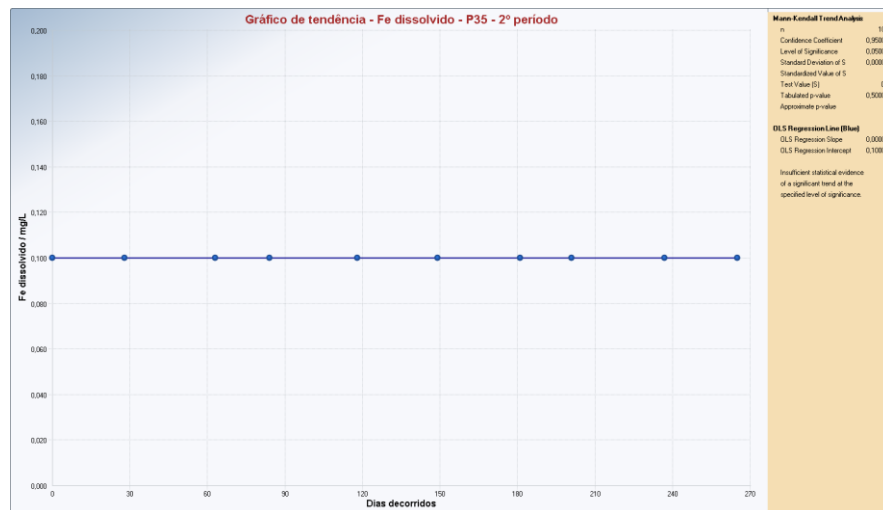
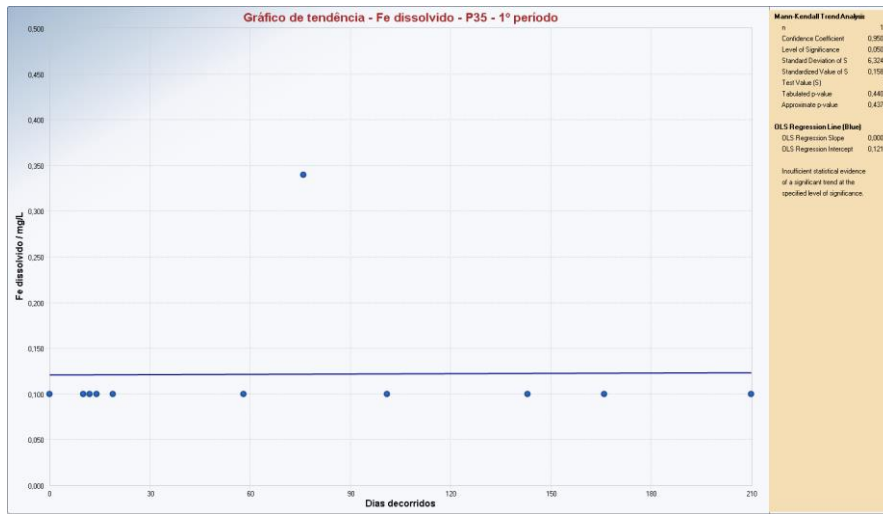
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P35



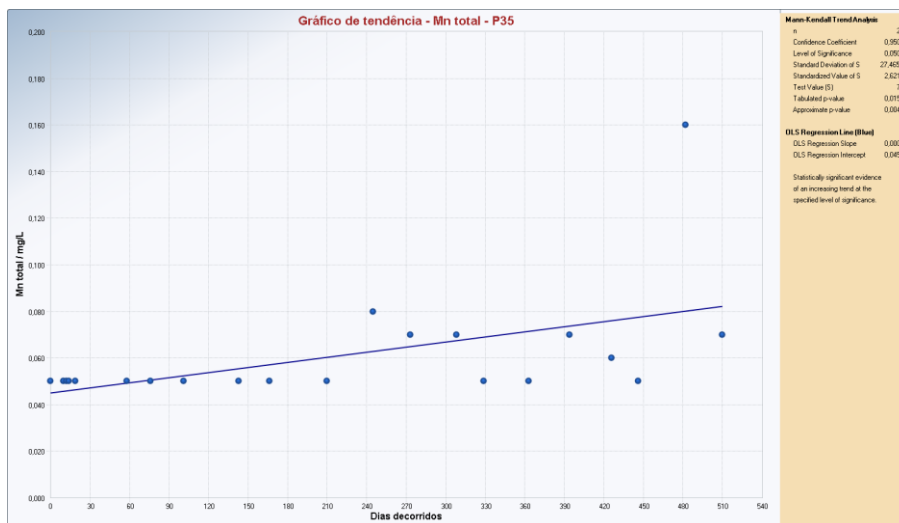
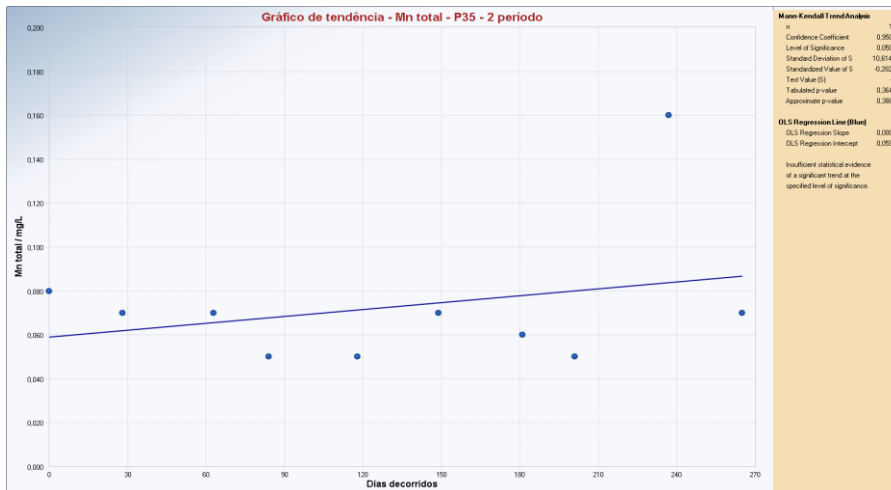
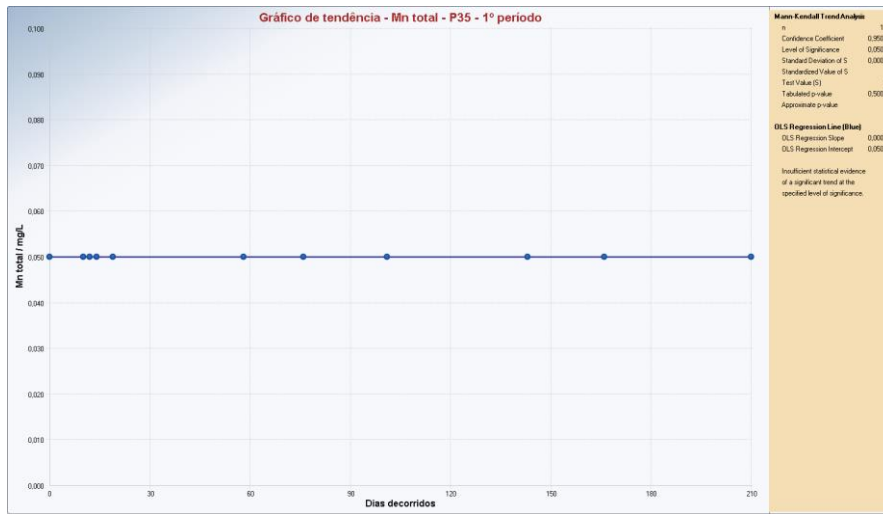
## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P35



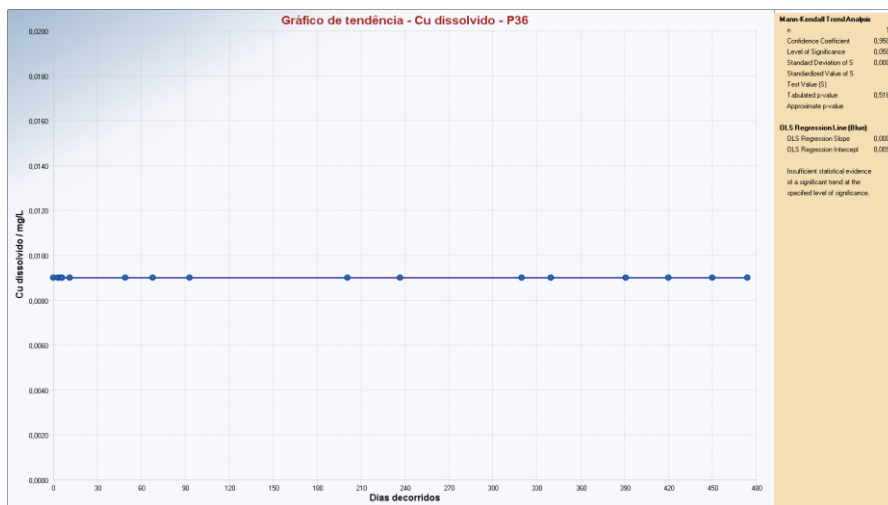
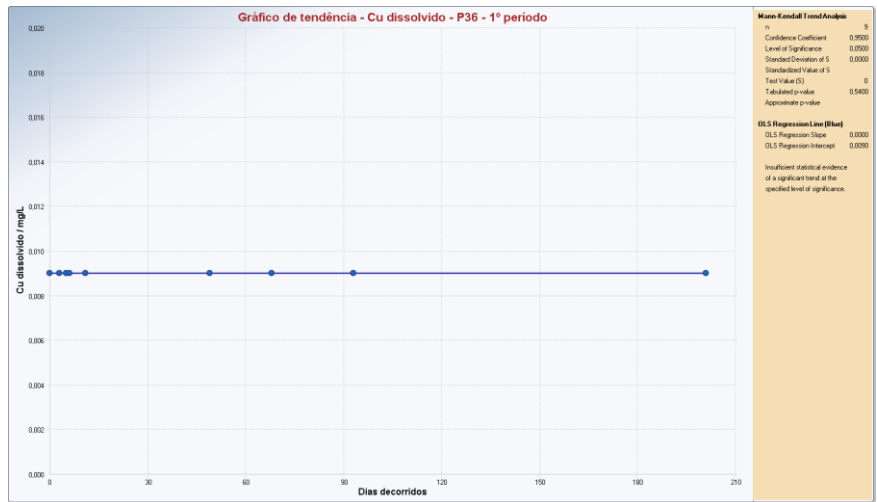
## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P35



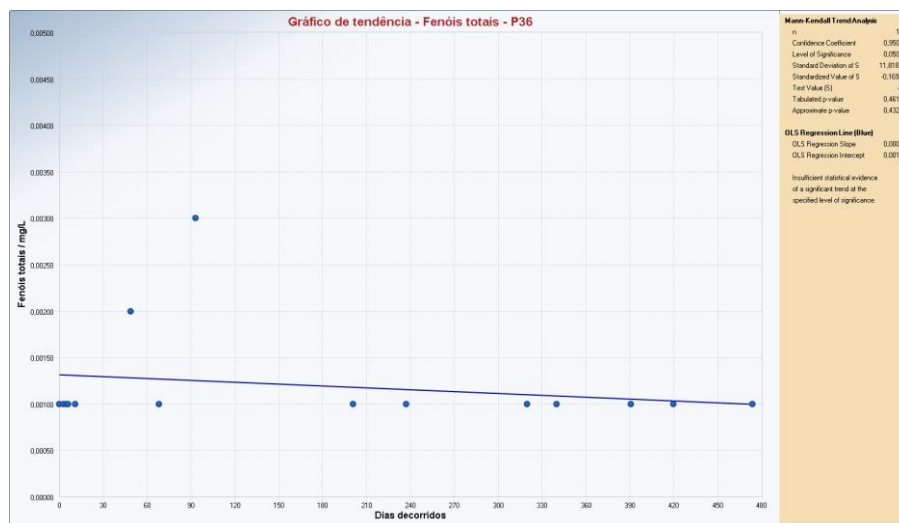
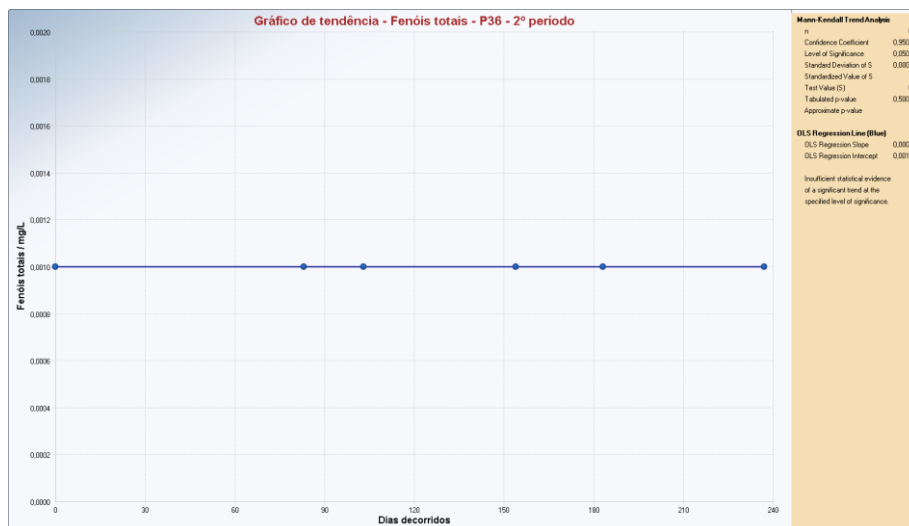
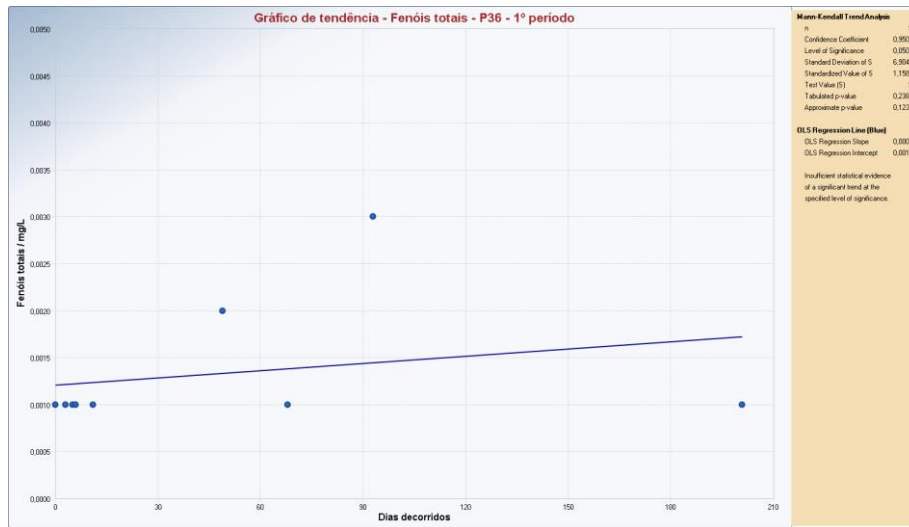
## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P35



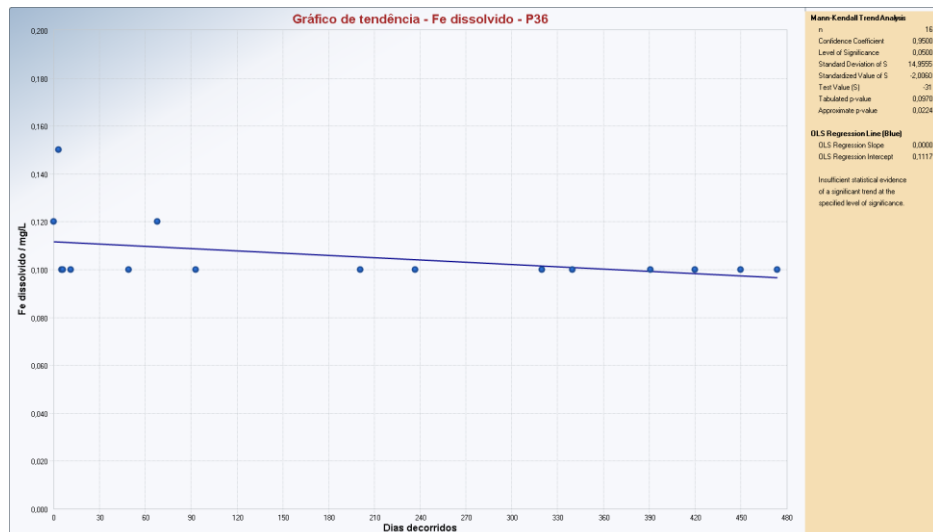
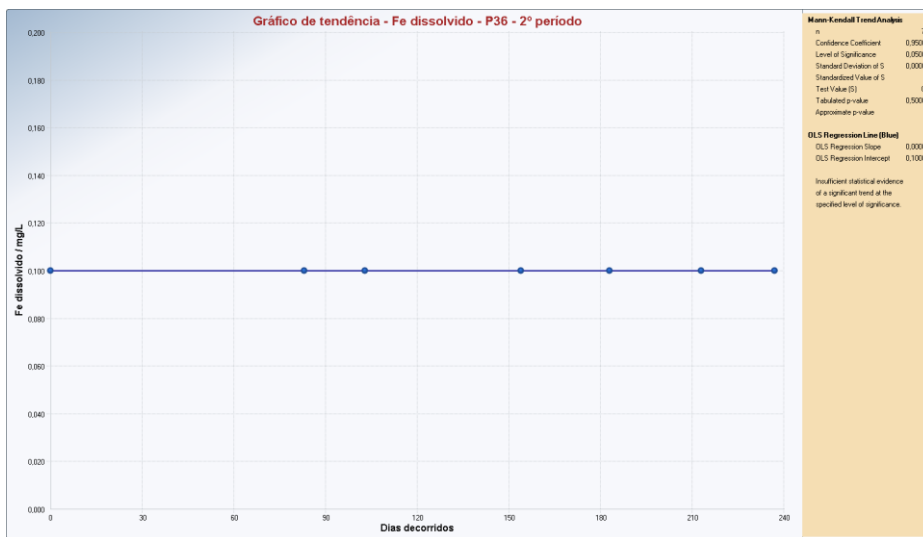
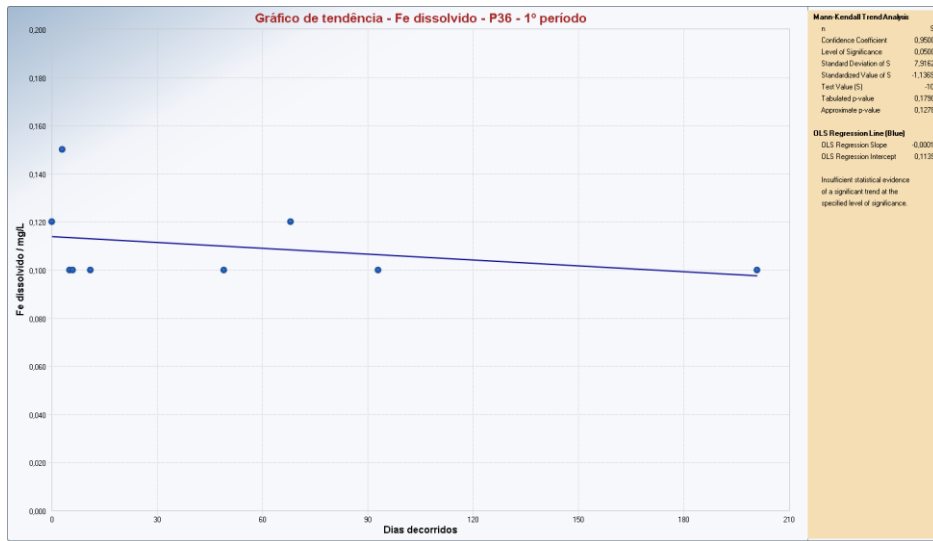
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P36



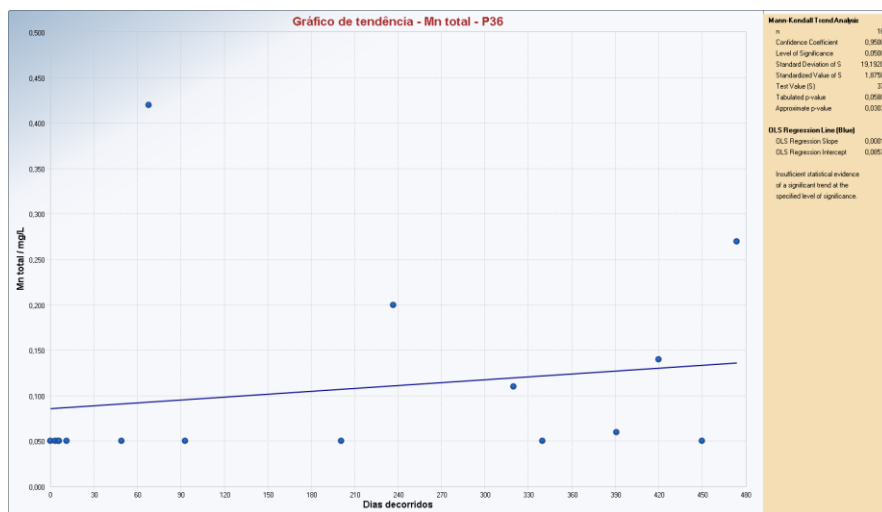
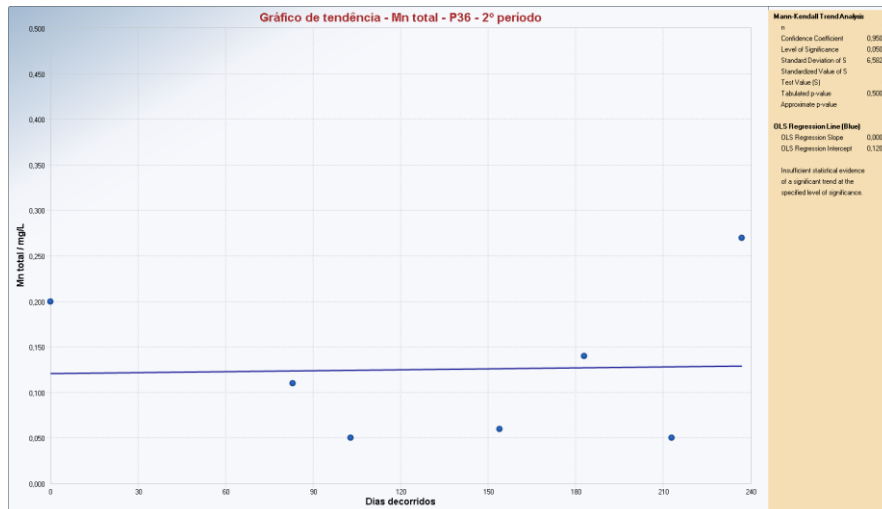
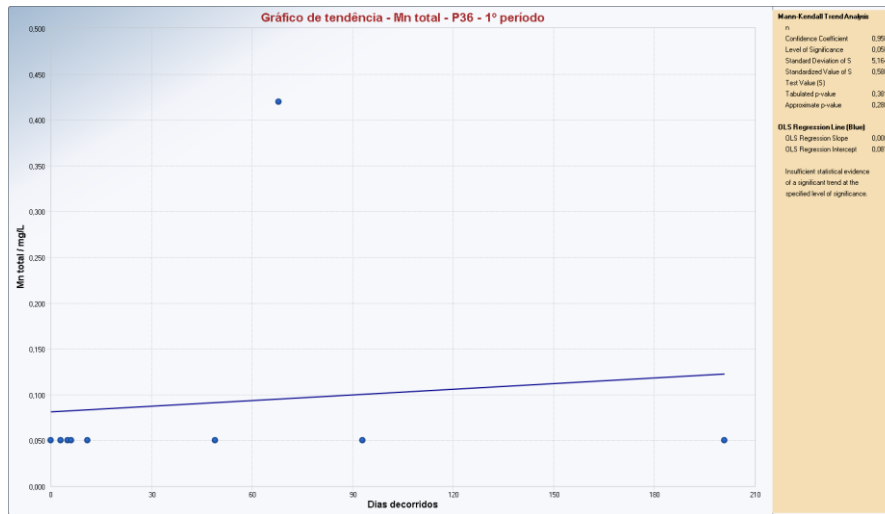
## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P36



## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P36

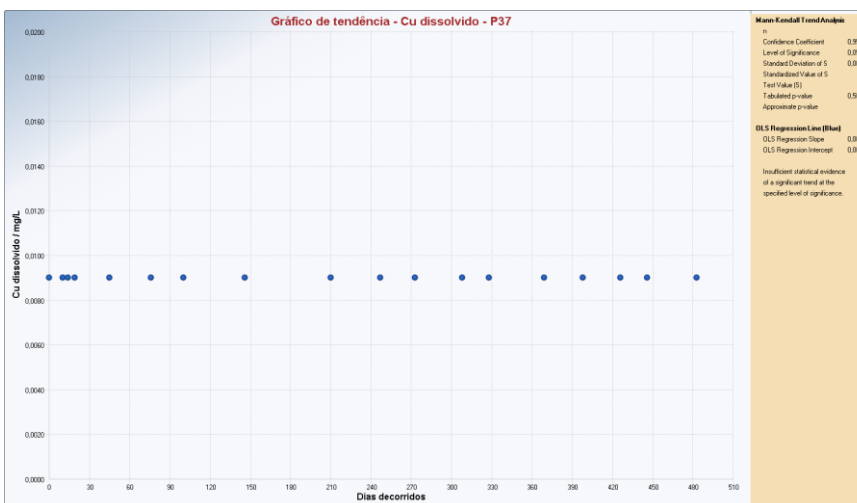
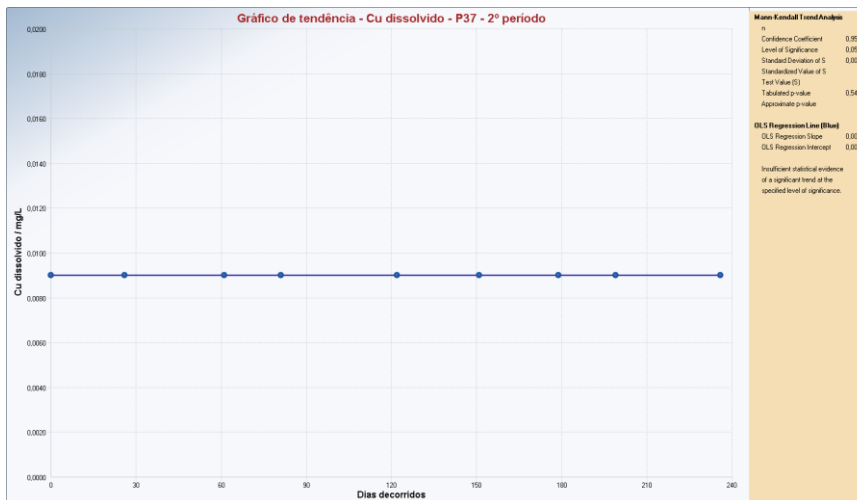
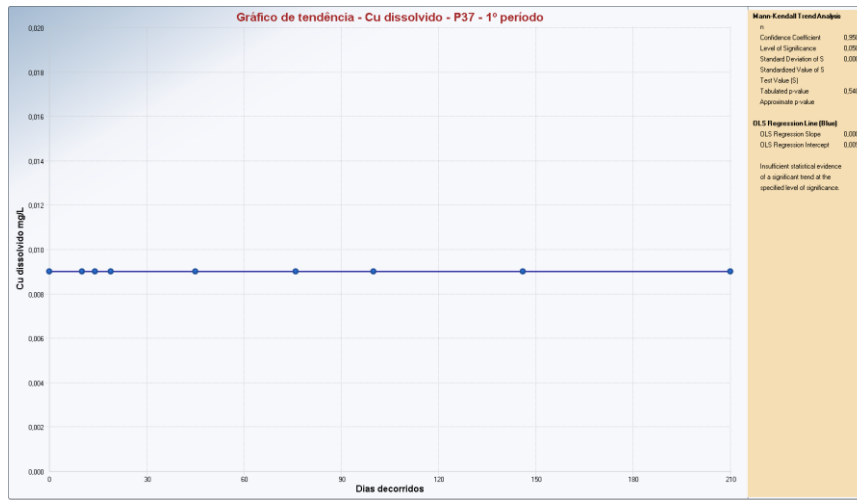


## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P36

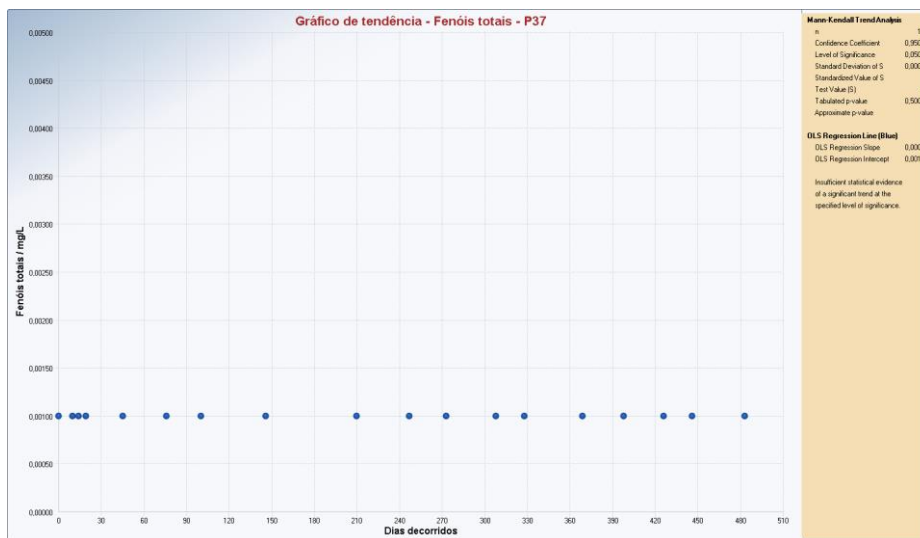
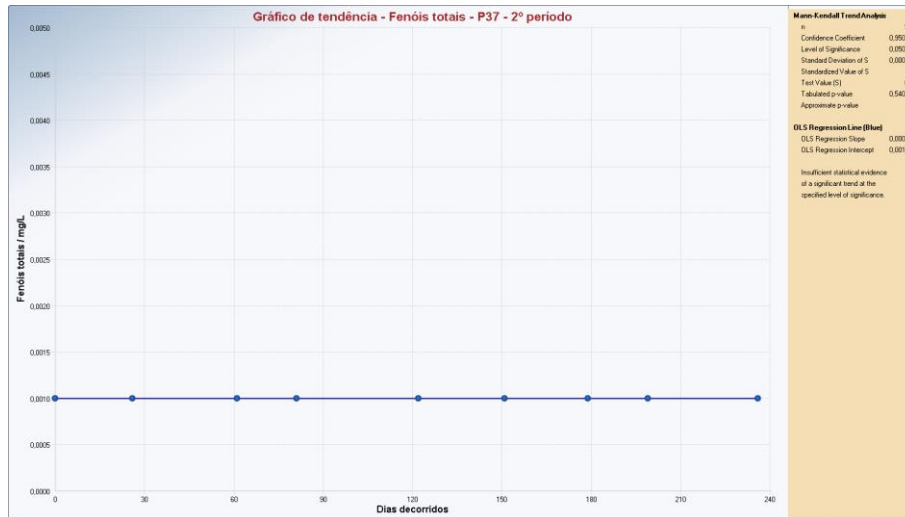
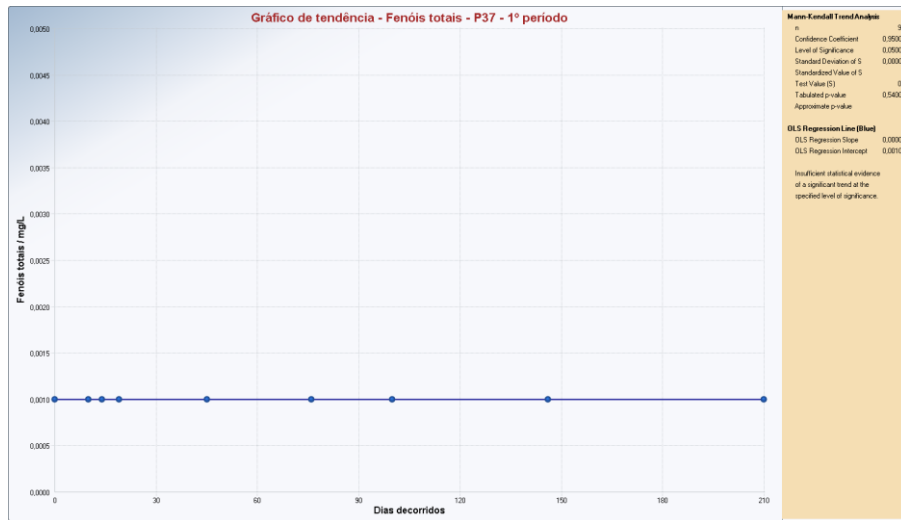




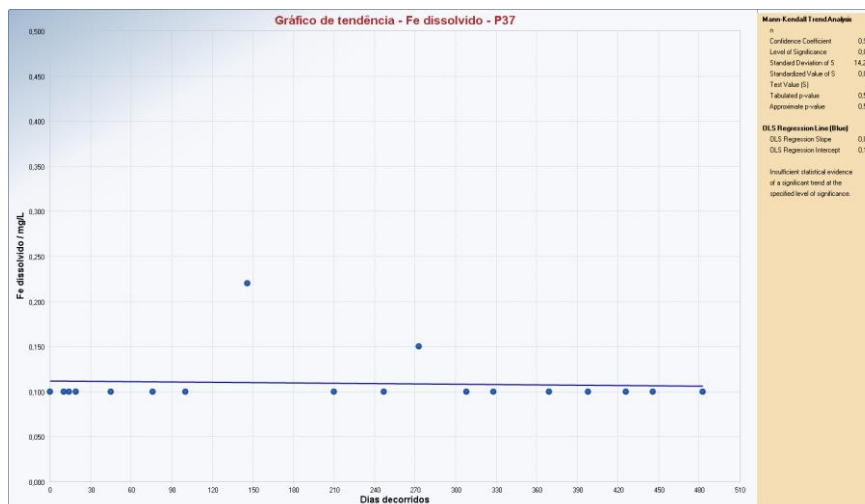
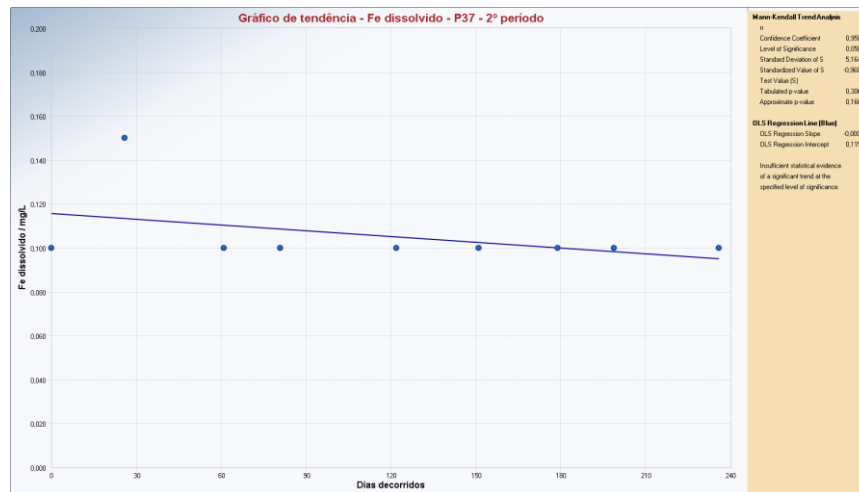
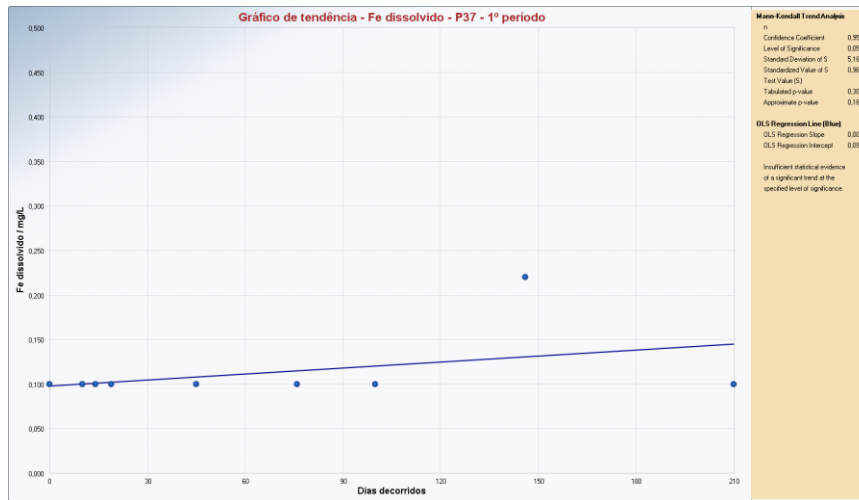
## Trend Test Parâmetro Cobre Dissolvido - Ponto P37



## Trend Test Parâmetro Fenóis Totais - Ponto P37



## Trend Test Parâmetro Ferro Dissolvido - Ponto P37



## Trend Test Parâmetro Manganês Total - Ponto P37

