



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO RESERVATÓRIO DA USINA
HIDRELÉTRICA DE COARACY NUNES-AMAPÁ**

Dissertação apresentada por:

CLAUBER DOS SANTOS BEZERRA

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Martins Correa (UFPA)

BELÉM – PA

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

B574c Bezerra, Clauber dos Santos

Caracterização hidrogeoquímica do reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes-Amapá / Clauber dos Santos Bezerra; Orientador: José Augusto Martins Correa– 2012
xiii, 82 f.: il.

Dissertação (mestrado em geoquímica e petrologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2012.

1. Geoquímica – Amapá. 2. Hidroquímica. 3. Química da água.
I. Corrêa, José Augusto Martins, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22° ed.: 551.9098116



Universidade Federal do Pará

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO RESERVATÓRIO DA
USINA HIDRELÉTRICA DE COARACY NUNES-AMAPÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

CLAUBER DOS SANTOS BEZERRA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

Data de Aprovação: 03 / 07 / 2012

Banca Examinadora:

Prof. JOSÉ AUGUSTO MARTINS CORRÊA
(Orientador-UFPA)

Prof. MARIA DE LOURDES SOUZA SANTOS
(Membro-UFPA)

Prof. SILVIA KEIKO KAWAKAMI
(Membro-UFPA)

AGRADECIMENTO

À Deus.

À minha mãe e irmã.

À empresa CENTRAIS ELETRICAS DO NORTE DO BRASIL (ELETRONORTE), pelo apoio financeiro e tecnológico para realização da pesquisa.

RESUMO

O trabalho caracterizou quimicamente a água do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, localizada no estado do Amapá, cerca de 20 km da cidade Ferreira Gomes e 150 Km da cidade de Macapá. As amostragens foram feitas em quatro campanhas trimestrais durante o ano, no período de outubro de 2008 a setembro de 2009, o trabalho teve por objetivo caracterizar o comportamento espacial e sazonal dos parâmetros químicos e físico-químicos da água do Reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes. No estado do Amapá o clima predominante é o Equatorial, nos meses das campanhas, dezembro a maio foi o período que apresentou maior índice de precipitações, e os meses de menores precipitações foi compreendido de agosto a novembro. No total foram amostrados 13 pontos em cada campanha, distribuídos a montante do reservatório de forma a representar todos os ambientes do reservatório. Em cada ponto foram coletadas amostras de água em quatro profundidades (superfície, dobro do secchi, meio e fundo). Nas amostras coletadas foram medidos os parâmetros físico-químicos como pH, temperatura, condutividade, íon amônio, STS, HCO_3^- , Dureza e OD. Os elementos químicos (Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Se, Sr, V, Zn) foram analisados por espectrometria de massa com fonte de plasma de argônio induzido (ICP-MS). Nas avaliações preliminares não evidenciamos estratificação no reservatório. as concentrações de alumínio, ferro e manganês se destacam nesse contexto, apresentam concentrações elevadas, uma vez que comparadas com as características químicas das águas da região amazônica. O reservatório apresentou as seguintes características químicas e físico-químicas, valores médios obtidos no período estiagem em ($\mu\text{g/L}$) : Al (487,44), Ca (604,12), Fe (458,78), K (798,05), Mg (625,40), Mn (123,42), Na (1903,719), Pb (3,86), pH (6,50), Cond. ($\mu\text{s/cm}$) (33,20), Temperatura $^{\circ}\text{C}$ (29,57), Dureza mg/L (5,61), HCO_3^- (10,8). O reservatório apresentou as seguintes características químicas e físico-químicas, valores médios obtidos no período chuvoso em ($\mu\text{g/L}$) : Al (430,48), Ca (527,74), Fe (511,57), K (700,97), Mg (485,67), Mn (84,06), Na (1899,18), Pb (5,25), pH (6,52), Cond. ($\mu\text{s/cm}$) (18,56), Temperatura $^{\circ}\text{C}$ (27,1), Dureza mg/L (6,09), HCO_3^- (9,00). O reservatório de Coaracy Nunes apresentou uma tendência a estratificação nas estações de coletas mais profundas, indicados pelos pontos MCN 02, MCN 03 e MCN 04, nos demais pontos essa tendência é menos marcada, pois os outros pontos possuem uma profundidade menor. Ao longo do eixo longitudinal do reservatório não

observamos nenhuma tendência do reservatório atuar como um sistema de retenção de substância em relação às que afluem a ele. Nos pontos amostrais de maior profundidade, o reservatório apresentou diminuição da concentração de oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade, gerando zonas anoxidas no fundo do reservatório, favorecendo a liberação de elementos químicos como Fe e Al, que se encontram incorporados à partículas em suspensão, através de processos anaeróbicos.

Palavras - chave: Geoquímica – Amapá. Hidroquímica. Química da água

ABSTRACT

This study characterized chemically the water of the reservoir of the hydroelectric power plant of Coaracy Nunes, located in the Amapá state, about 20 km from the city Ferreira Gomes and 150 km from the city of Macapa. Samples were collected in four quarterly campaigns during the year, in the period October 2008 to September 2009, the study aimed to characterize the spatial and seasonal behavior of chemical parameters, and physical-chemicals of the water in the reservoir of the hydroelectric power plant of Coaracy Nunes. In the Amapá state, the predominant climate is equatorial, in the months of the campaigns, from December to May was the period with the high estrate of rainfalls, and the months of lowest rainfalls was understood from August to November. In the total 13 point were sampled in each campaign, distributed upstream of the reservoir in order to represent all environments of the reservoir. At each point, samples were collected from water at four depths (surface, double the secchi, middle and bottom). In the collected samples were measured physicochemical parameters such as pH, temperature, conductivity, ammonium ion, STS, HCO_3^- , hardness and OD. The chemical elements (Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Se, Sr, V, Zn) were analyzed by mass spectrometry of a source for inductively coupled argon plasma. (ICP-MS). In preliminary assessments none showed evidence stratification in the reservoir. The concentrations of aluminum, iron and manganese are highlighted within this context, and have high concentrations, once compared with the chemical characteristics of waters of the Amazon region. The reservoir had the following chemical and physical-chemical particulars average values obtained during dry periods in ($\mu\text{g/L}$) : Al (487,44), Ca (604,12), Fe (458,78), K (798,05), Mg (625,40), Mn (123,42), Na (1903,719), Pb (3,86), pH (6,50), Cond. ($\mu\text{s/cm}$) (33,20), temperature $^{\circ}\text{C}$ (27,1), hardness mg/L (6,09), HCO_3^- (9,00). The reservoir of Coaracy Nunes presented a tendency to stratification in the deepest collection stations indicated by the points MCN 02, MCN 03 e MCN 04, in other points this trend is less marked, because the other points have less depth. Throughout the longitudinal axis of the reservoir we did not observe any tendency of the reservoir act as a retention system of substance in relation to that flock to it. Sampling points in greater depth, the reservoir has decreased the concentration of dissolved oxygen with increasing depth, creating anoxic zones in the reservoir bottom, favoring the release of chemical elements as Fe and Al which are incorporated to the particles in suspension, through the anaerobic processes.

Key words: Geochemical – Amapá. Hydrochemistry. Chemistry of the water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Usinas hidrelétricas por ano de instalação	6
Figura 2 - Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes.....	8
Figura 3 - Carta imagem do reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes com a distribuição dos pontos na montante (MCN01, MCN02, MCN03, MCN04, MCN05, MCN06, MCN07, MCN08, MCN09, MCN10, MCN11, MCN12, MCN13).....	10
Figura 4 - Precipitação média mensal, na área do reservatório, durante um ano..	11
Figura 5 - Mapa geológico da região do Médio Araguari	12
Figura 6 - Unidades morfoestruturais do estado do Amapá.	15
Figura 7 - Mapa com a localização do município da Serra do Navio.	19
Figura 8 - Mapa geológico de Serra do Navio, mostrando posicionamento dos afloramentos do minério manganêsífero em cristas topográficas.	20
Figura 9 - Esquema de um ICP-MS convencional, onde A é a amostra líquida; B, o nebulizador; C, o aerossol; D, a câmara de nebulização; E, a tocha de ICP; F, o cone amostrador; G, o cone skimmer; H, as lentes iônicas; I é o analisador de massa; J, o sistema de detecção; K e L são bombas de vácuo turbo molecular (alcançam vácuo de 5×10^{-9} barr e $< 1 \times 10^{-7}$ barr, respectivamente) e M é a bomba de vácuo mecânica (2×10^{-3} barr).	26
Figura 10 - Quadrupolo – íons de círculos fechados foram modulados por campo elétrico flutuante (RF), enquanto que os íons de círculo aberto não foram modulados e acabam se chocando contra parede.	27
Figura 11 - Sistema de introdução de amostra em ICP-MS: A) Amostra B) Bomba peristáltica. C) Nebulizador D) Gás de arraste. E) Câmara de nebulização. F) Descarte	29
Figura 12 - Temperatura encontrada em plasma induzido.	30
Figura 13 - Representação dos processos que ocorrem no plasma	30
Figura 14 - Esquema de uma tocha. Representação: a) Dos três tubos concêntricos, acoplados a uma bobina de indução de um gerador de RF, b) Do campo magnético	31
Figura 15 - Configuração do cone de amostragem, do estágio de expansão e do cone Skimmer.	32
Figura 16 - Esquema de um analisador de massas quadrupolar. a) movimento dos íons através do campo gerado entre as hastes; b) vista frontal dos cilindros	33
Figura 17 - (a) Garrafa de Van Dorn; (b) Eco Batímetro.	36
Figura 18 - (a) Disco de Secchi; (b) Frascos de 50 mL do tipo eppendorf.	37
Figura 19 - Determinação do pH da água.	38

Figura 20 - Determinação da condutividade elétrica da água.	38
Figura 21 - Espectrofotômetro Micronal B 582.	39
Figura 22 - Espectrometria de massa com fonte de plasma de Argônio induzido (ICP-MS) modelo Elan DRC II (Perkin-Elmer, Norwalk, CT).....	42
Figura 23 - Diagrama de Piper das amosras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (primeira campanha – período seco).....	49
Figura 24 - Diagrama de Piper das amosras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (segunda campanha – período chuvoso).....	50
Figura 25 - Diagrama de Piper das amosras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (terceira campanha – período chuvoso).....	50
Figura 26 - Diagrama de Piper das amosras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (quarta campanha – período seco).....	51
Figura 27 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do cálcio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	58
Figura 28 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do potássio ($\mu\text{g/L}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	59
Figura 29 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do sódio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	60
Figura 30 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do magnésio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	61
Figura 31 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do alumínio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	63
Figura 32 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do manganês ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	64
Figura 33 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do ferro ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	66

Figura 34 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do chumbo ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.....	67
Figura 35 - Valores médios de pH e Oxigênio dissolvido nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.....	69
Figura 36 - Valores médios de íon amônio nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.....	70
Figura 37 - Valores médios de condutividade nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.....	70
Figura 38. Valores médios de Al, Fe e Mn nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.....	71
Figura 39 - Comportamento sazonal (média dos valores obtidos) de Ca, K, Mg e Na, nos meses de outubro/08 (seco), fevereiro/09 (chuvoso), Maio/09 (chuvoso) e Setembro/09 (seco).	72
Figura 40 - Variações dos valores médios da condutividade elétrica, das quatro campanhas ao longo dos pontos longitudinais do reservatório.....	72
Figura 41 - Variação dos valores médios de teor de alumínio ($\mu\text{g/L}$) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanhas, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).	73
Figura 42 - Variação dos valores médios de teor de Manganês ($\mu\text{g/L}$) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanhas, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).	74
Figura 43 - Variação dos valores médios de teor de Ferro (mg/L) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanha, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).	74
Figura 44 - Relação profundidade com aumento de concentração de Fe e Al.....	75
Figura 45 - Relação oxigênio dissolvido com aumento de profundidade no ponto MCN02... ..	76
Figura 46 - Relação da profundidade com aumento de concentração de Fe e Al, no ponto MCN 03.....	77
Figura 47 - Relação do oxigênio dissolvido com aumento de profundidade no ponto MCN 03.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disponibilidade Hídrica e vazões médias e de estiagem.....	7
Tabela 2 - Composição média do minério de manganês metalúrgico comercializado pela ICOMI.	20
Tabela 3 - Período das Campanhas.....	35
Tabela 4 - Pontos de amostragem e suas coordenadas (UTM).....	35
Tabela 5 - Materiais e reagentes utilizados na análise de íon amônio.....	39
Tabela 6 - Instrumentação e parâmetros utilizados.	43
Tabela 7 - Coeficiente de correlação, limite de detecção (L.D.) e de quantificação dos analitos.....	45
Tabela 8 - Análise do material de referência de água de rio SLRS-4, valores expressos como média \pm SD, n = 3).	46
Tabela 9 - Resumo estatístico dos resultados químicos ($\mu\text{g.L}^{-1}$) e físico-químicos da água do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes – Amapá (período de estiagem).	47
Tabela 10 - Resumo estatístico dos resultados químicos ($\mu\text{g.L}^{-1}$) e físico-químicos da água do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes – Amapá (período chuvoso).....	48
Tabela 11 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09 – (MCN 04).	54
Tabela 12 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09.	55
Tabela 13 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 04 – (MCN 04).	56
Tabela 14 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09 – (MCN 09)	57

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
SUMÁRIO	xii
1 INTRODUÇÃO	2
2 OBJETIVO	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 RECURSOS HÍDRICOS.....	4
3.2 O POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO	4
4 ÁREA DE ESTUDO	9
4.1 LOCALIZAÇÃO.....	9
4.2 ASPECTOS AMBIENTAIS.....	11
4.2.1 Clima	11
4.2.2 Geologia	12
4.2.3 Geomorfologia	13
4.2.4 Hidrografia	15
4.2.5 Vegetação	17
4.3 EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO NA SERRA DO NAVIO	17
5 MATERIAIS E MÉTODOS	22
5.1 MAPAS GEOQUÍMICOS	22
5.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DE METAIS E ESPÉCIES QUÍMICAS	23
5.3 ESPECTROMETRIA DE MASSA COM FONTE DE PLASMA DE ARGÔNIO INDUZIDO (ICP-MS).....	24
5.3.1 Componentes de um ICP-MS	25
5.3.2 Introdução de amostras no ICP-MS	28
5.3.3 Fonte de ionização do ICP-MS (Tocha e plasma)	29
5.3.4 Interface	31
5.3.5 Analisador de massas quadrupolar	32

5.3.6 Sistema de detecção	33
5.3.7 Interferências em ICP-MS	34
5.4 ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM E PERIODICIDADE DAS COLETAS	34
5.5 TRABALHOS EM CAMPO	36
5.5.1 Parâmetros físico-químicos	37
5.6 TRABALHOS PÓS-CAMPO	39
5.6.1 Íon amônio	39
5.6.2 Sólidos totais em suspensão (STS)	40
5.6.3 Dureza	40
5.6.4 Oxigênio dissolvido	40
5.7 PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA.....	41
5.8 INSTRUMENTAÇÃO	41
5.9 CALIBRAÇÃO DO ICP-MS	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1 CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA.....	48
6.2 VARIAÇÕES HIDROQUÍMICAS SUPERFICIAIS	51
6.2.1 Variações superficiais dos parâmetros físico-químicos e físicos	51
6.2.2 Análise de correlação entre os parâmetros físico-químicos período seco	53
6.2.3 Análise de correlação entre os parâmetros físico-químicos período chuvoso	55
6.3 VARIAÇÕES SUPERFICIAIS DOS PRINCIPAIS CÁTIONS.....	57
6.3.1 Cálcio	57
6.3.2 Potássio	59
6.3.3 Sódio	60
6.3.4 Magnésio	61
6.4 VARIAÇÕES SUPERFICIAIS DE ELEMENTOS TRAÇO	62
6.4.1 Alumínio	62
6.4.2 Manganês	63
6.4.3 Ferro	65
6.4.4 Chumbo	66
6.5 HIDROQUÍMICA	68
6.5.1 Variações hidroquímicas com a profundidade	68
7 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

O estado do Amapá possui uma superfície de aproximadamente 143 mil km², e uma população estimada, no ano de 2007, em 587.311 mil habitantes (IBGE, 2008). É formado por dezesseis municípios, sendo Macapá e Santana os mais populosos. A atividade econômica principal é a extrativista, apresentando como principais matérias-primas: madeira, minerais, extração de castanha etc. (Souto, 2009).

A Amazônia possui a maior bacia hidrográfica do mundo com uma área de $7,1 \times 10^6$ km². O rio Amazonas é o canalizador final de todo seu sistema aquático e descarrega no oceano atlântico, cerca de $175.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Este gigantesco volume de água encerra um potencial hidrelétrico estimado em cerca de 100.000MW (Junk & Mello, 1987).

Na Amazônia as principais bacias hidrográficas principalmente do sul e do sudeste do Brasil foram reguladas pela construção de inúmeros reservatórios para a geração de hidroeletricidade, o que se constituiu em um significativo impacto na qualidade e na quantidade das águas dos rios dessas bacias hidrográficas, mas ao mesmo tempo suportou o desenvolvimento econômico e o progresso da infra-estrutura, nessas regiões em particular. Os impactos e os benefícios da construção de represas são bem conhecidos e detalhados em inúmeros estudos de caso e pesquisas científicas nas áreas de limnologia, engenharia, geologia e geografia. (Pereira, 2004).

Os reservatórios são sistemas complexos intermediários entre os rios e lagos, cuja evolução depende da entrada de várias informações no tempo e espaço, ou seja, são partes integrantes de uma bacia hidrográfica e, portanto são excelentes detentores de todos os impactos das atividades antropogênicas que se desenvolvem na bacia (Tundisi & Straskraba, 1999). Portanto, devem ser monitorados e geridos de modo a terem o maior tempo útil e a melhor qualidade de água possível.

Metodologias referentes ao controle físico-químico das águas e ao transporte de material em suspensão em uma bacia hidrográfica se constituem no monitoramento hidrogeoquímico, o qual considera os efeitos globais e locais das alterações naturais ou antrópicas ocorridas no interior da bacia em estudo, tanto a níveis qualitativos quanto quantitativos (Mortatti, 1995).

A caracterização hidrogeoquímica de águas de reservatório configura uma ferramenta útil para o estudo desses sistemas, conseguindo alcançar o objetivo de avaliar as alterações que estão afetando o corpo hídrico estudado.

Este trabalho entra com o propósito de realizar uma caracterização hidrogeoquímica nas águas do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, que foi construída na Bacia Hidrográfica do Rio Araguari.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar quimicamente a água do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, composta pela confluência dos rios Amapari e Araguari – estado do Amapá, visando avaliar as características hidroquímicas da água do reservatório.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar quimicamente a coluna d'água do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes em toda sua extensão.
- Avaliar o comportamento sazonal de variáveis químicas entre o período de outubro de 2008 a setembro de 2009, em 13 pontos de amostragem dentro do reservatório.
- Avaliar os seguintes parâmetros químicos e físico-químicos: Temperatura, Condutividade Elétrica, pH, íon amônio, Sólidos totais em suspensão, bicarbonato, oxigênio dissolvido, alumínio, arsênio, Bário, berílio, cálcio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, mercúrio, potássio, lítio, magnésio, manganês, sódio, níquel, chumbo, selênio, estrôncio, vanádio e zinco.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RECURSOS HÍDRICOS

A importância desse recurso natural para a vida é fundamental e indispensável, pois todos os seres vivos necessitam dele para sobreviver. Porém, sua presença em diferentes quantidades torna-se um fator limitante não só para o desenvolvimento econômico de uma região, mas também para o estabelecimento dos vários ecossistemas existentes (BRAGA et al. 2002).

Atualmente, considera-se que a quantidade total de água na Terra é de 1.386 milhões de km^3 , sendo que esse volume tem permanecido constante no globo terrestre durante os últimos 500 milhões de anos (ANEEL, 2002). Tal valor se divide em águas subterrâneas (lençóis freáticos e aquíferos), superficiais (oceanos, rios, lagos e represas, dentre outros), congeladas (calotas polares e geleiras) e dispersas na atmosfera (na forma de umidade do ar).

Dentre a grande maioria dos países, o Brasil é o que possui a maior disponibilidade de água, uma vez que suas coleções hídricas representam 11% do total mundial, com um volume *per capita* de aproximadamente $36.575,46 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$. Os rios brasileiros produzem uma vazão de cerca de $168.790 \text{ m}^3/\text{s}$. Somando-se a vazão gerada na área da floresta amazônica, estimada em $89.000 \text{ m}^3/\text{s}$, a oferta de água total do país alcança a casa dos $257.790 \text{ m}^3/\text{s}$. Mesmo com tamanho volume, os escoamentos superficiais específicos das várias localidades brasileiras variam muito, indo desde $48,21 \text{ L/s}/\text{km}^2$ (na Região Hidrográfica do Atlântico Norte) e $34,21 \text{ L/s}/\text{km}^2$ (na Região Hidrográfica Amazônica), até $2,81 \text{ L/s}/\text{km}^2$ (na Região Semi-Árida do Atlântico Leste) e $4,5 \text{ L/s}/\text{km}^2$ (na BH do rio São Francisco). Dessa forma, como o país enfrenta problemas ligados à má distribuição de sua população, uma vez que a maior parte da mesma encontra-se localizada em locais com baixa disponibilidade hídrica, surgem problemas de escassez em algumas regiões, principalmente na época de estiagem, como em algumas localidades do sudeste do Brasil. Esse comportamento não se observa na Região Amazônica, que possui a maior oferta de água doce do Brasil (TUCCI, 2001, ANEEL, 2002, MMA, 2004).

3.2 O POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

A energia hidrelétrica é produzida a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um curso d'água, combinando a utilização da vazão do rio, quantidade de água disponível em um determinado período de tempo, com os seus desníveis, sejam os naturalmente

formados, como as quedas d'água, sejam os criados com a construção de barragens. Assim, a potência hidráulica disponível em determinado local de um rio é dada pelo produto da vazão, a altura existente entre o reservatório, a montante, e o sistema de descarga, a jusante da barragem, e a aceleração da gravidade. Dada, portanto, a vazão de um rio, os melhores aproveitamentos, do ponto de vista energético, se dão nos pontos onde se pode conseguir maior queda (EPE, 2007).

As principais variáveis utilizadas na classificação de uma usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização, tipo de barragem e reservatório. Todos são fatores interdependentes. Assim, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e determinará qual será a capacidade instalada - que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório (ANEEL, 2008).

Existem dois tipos de reservatórios: acumulação e fio d'água. Os primeiros, geralmente localizados na cabeceira dos rios, em locais de altas quedas d'água, dado o seu grande porte permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. As unidades a fio d'água geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, pela vazão com mínimo ou nenhum acúmulo do recurso hídrico (ANEEL, 2008).

A potência instalada determina se a usina é de grande ou médio porte ou uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) adota três classificações: Centrais Geradoras Hidrelétricas (com até 1 MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30 MW). No Brasil, de acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da ANEEL, em novembro de 2008, existem em operação 227 CGHs, com potência total de 120 MW; 320 PCHs (2,4 mil MW de potência instalada) e 159 UHE com uma capacidade total instalada de 74, 632 mil MW. Em novembro de 2008, as usinas hidrelétricas, independentemente de seu porte, respondem, portanto, por 75,68% da potência total instalada no país, de 102, 262 mil MW. Na figura 01 são apresentadas as usinas hidrelétricas instaladas no Brasil (ANEEL, 2008).



Figura 1 - Usinas hidrelétricas por ano de instalação

Fonte: (ANEEL, 2010).

De acordo com a Figura 01, o relevo da região centro-sul do Brasil, mais favorável ao aproveitamento de seus potenciais hidrelétricos, conjugado com o processo de ocupação do território brasileiro e de desenvolvimento socioeconômico do país, levou a uma forte concentração das usinas hidrelétricas nessa região.

Segundo levantamento de dezembro de 2007, realizado pela Agência Nacional de Águas, a vazão média anual dos rios em território brasileiro é de 179 mil m³/s, correspondendo a aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos (1,5 milhões de m³/s). A região hidrográfica Amazônica detém 73,6% dos recursos hídricos superficiais do Brasil, ou seja, a vazão média desta região é quase três vezes maior que a soma das vazões das demais regiões hidrográficas. A Tabela 01 ilustra os resultados para cada Região Hidrográfica do país (ANA, 2010).

Tabela 1. Disponibilidade Hídrica e vazões médias e de estiagem

Região Hidrográfica	Vazão Média¹ (m³/s)	Disponibilidade Hídrica (m³/s)	Estiagem-Q95 (m³/s)
Amazônica	132.145	73.748	73.748
Tocantins-Araguaia	13.799	5.447	2.696
Atlântico Nordeste Ocidental	2.608	320	320
Parnaíba	767	379	294
Atlântico Nordeste Orienta	774	91	32
São Francisco	2.846	1886	852
Atlântico Leste	1.484	305	252
Atlântico Sudeste	3.162	1109	986
Atlântico Sul	4.055	647	647
Paraná	11.414	5792	3.901
Uruguai	4.103	565	394
Paraguai	2.359	782	782
Brasil	179.516	91.071	84.904

¹ A bacia amazônica ainda compreende uma área de 2,2 Km² em território estrangeiro a qual contribui com adicionais de 86.326 m³/s em termos de vazão média.

Fonte: (ANA, 2010)

O estudo sobre energia hidrelétrica constante do Plano Nacional de Energia (PNE 2030, 2007) 2030 relaciona o potencial de aproveitamento ainda existente em cada uma das bacias hidrográficas do país. A bacia do rio Amazonas é a maior, com um potencial de 106 mil MW, onde apenas 1% do seu potencial hidrelétrico é utilizado. A tímida utilização dos recursos hidrelétricos da Região Amazônica se deve a vários motivos. Um deles é o fato de que as usinas hidrelétricas geram impactos ambientais de grandes proporções na floresta. Além disso, em razão do fato da Amazônia ser um ecossistema muito frágil e de grande importância ambiental, ocorre o desencorajamento, mesmo nos dias atuais, da implantação de empreendimentos dessa natureza em seus domínios. Mesmo assim, algumas usinas foram construídas nesse bioma (PNE, 2007).

Atualmente, existem em operação nesta bacia apenas cinco Unidades Hidrelétricas de Energia (UHE): Balbina (AM), Samuel (RO), Coaracy Nunes (AP), Curuá-Una (PA) e Guaporé (MT).

A primeira delas foi a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes; esta usina está edificada no médio curso do Rio Araguari (AP), nas proximidades do município de Ferreira Gomes,

sendo gerida pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), que, por sua vez, possui uma área de atuação que engloba Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e parte de Goiás, o que corresponde a 58% do território nacional. A Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (Figura 02) foi edificada durante 20 anos, tendo sido inaugurada em 13 de janeiro de 1976. Ela possui dez vertedouros e três turbinas, sendo duas com potência de 24 MW e uma de 30 MW, perfazendo um total de 78 MW (PROVAM, 1990, ANEEL, 2005, ELETRONORTE, 2009).



Figura 2 - Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes.

Para que se realize o aproveitamento de potenciais hidráulicos com a finalidade de geração de energia elétrica é necessário que seja empreendido grandes alterações no meio natural (VIANA, 2002). A inundação de áreas que ocorre, na maioria dos casos, em regiões produtivas e/ou com grande diversidade biológica, é a maior delas. As hidrelétricas são causadoras de uma série de alterações ambientais, muito discutidas por pesquisadores e especialistas da atualidade.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes está localizada no estado do Amapá, cerca de 15 km da cidade Ferreira Gomes e 150 km da cidade de Macapá, nas coordenadas $0^{\circ} 54' N$ de latitude e $51^{\circ} 15' W$ de longitude. A usina utiliza o potencial hídrico do rio Araguari.

Na Figura 05 está representada a carta imagem da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, com a localização dos pontos de amostragem das quatro campanhas.

UHE Coaracy Nunes - Localização de pontos amostrais.

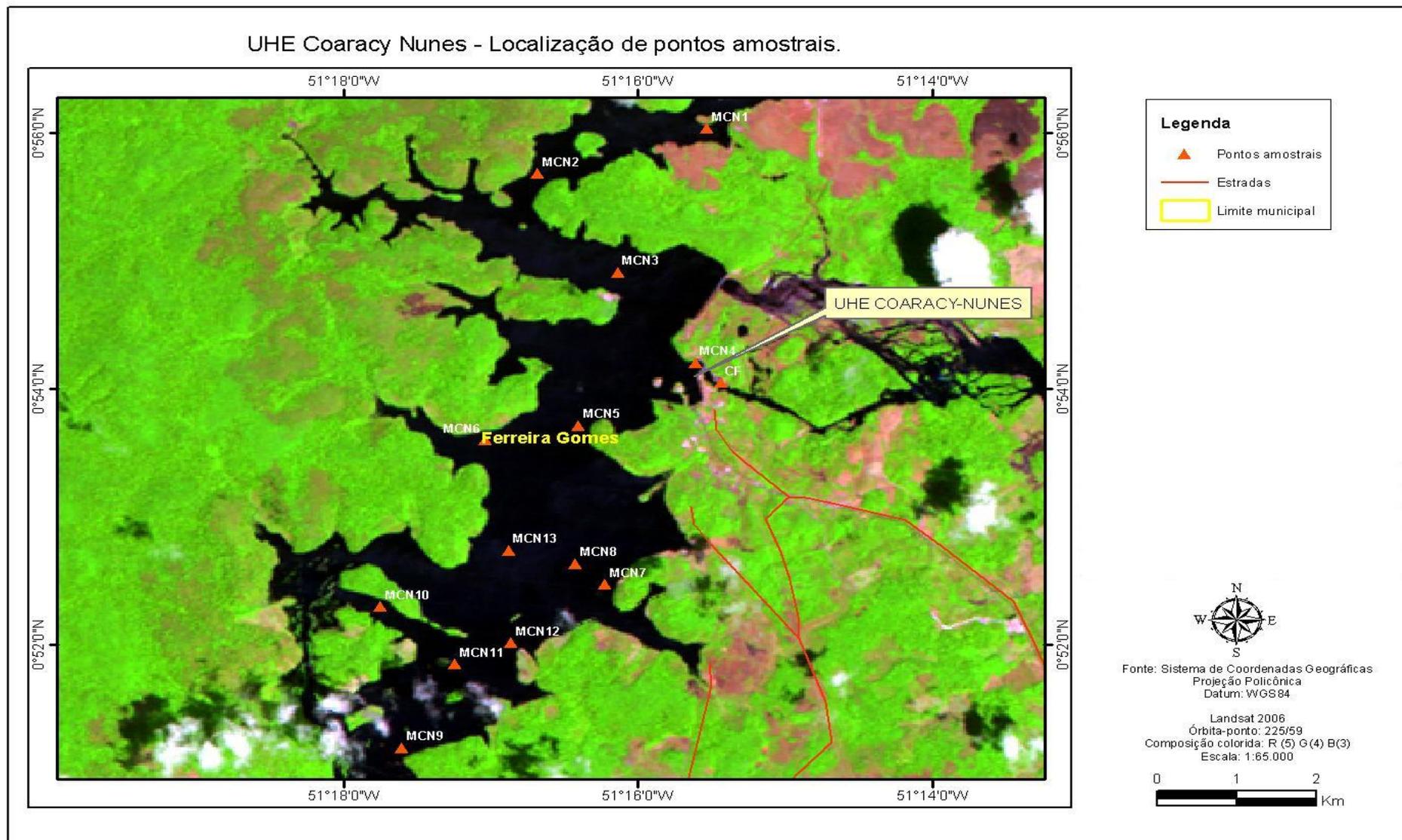


Figura 3 - Carta imagem do reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes com a distribuição dos pontos na montante (MCN01, MCN02, MCN03, MCN04, MCN05, MCN06, MCN07, MCN08, MCN09, MCN10, MCN11, MCN12, MCN13).

4.2 ASPECTOS AMBIENTAIS

4.2.1 Clima

A figura 06 apresenta a precipitação média mensal dos meses: outubro de 2008 a setembro de 2009, período de execução das campanhas de campo. Os dados foram coletados da estação CUPUXI, localizada no encontro dos rios Araguari e Amapari, nas coordenadas latitude: 0° 36'54.000 Longitude -51° 45'54.000.

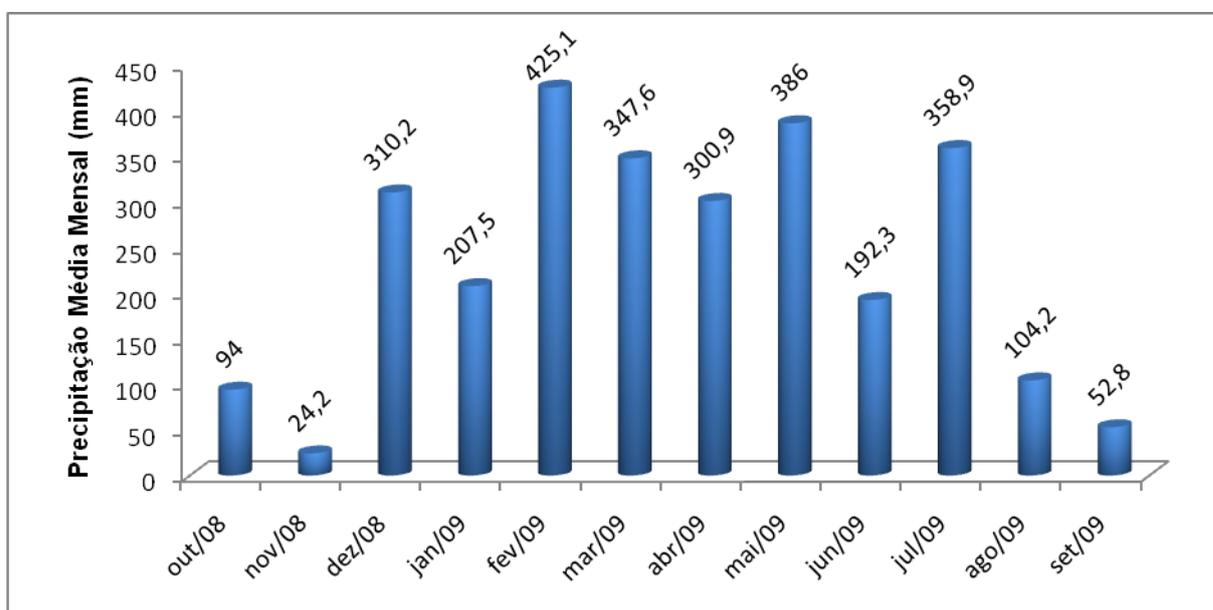


Figura 4 - Precipitação média mensal, na área do reservatório, durante um ano. Fonte: Sistema Nacional de Recursos Hídricos: Banco de dados Hidrometeorológico (2009).

A média total anual de precipitações na região estudada é de 3.000 mm. O clima predominante no estado é o Equatorial (Super Úmido e Úmido); as temperaturas médias anuais variam de 26,1°C a 31 °C; a média anual da umidade relativa do ar está compreendida entre 80% e 90%.

De acordo com os dados coletados da estação CUPUXI, durante os períodos de campanha, os meses de dezembro a maio, apresentam maiores precipitações, e os meses de menores precipitações está compreendido de agosto a novembro.

4.2.2 Geologia

O estado do Amapá apresenta peculiaridades, intrínsecas ao seu processo de formação geológica, localização geográfica, estando o mesmo diretamente influenciado pela dinâmica do Sistema de Dispersão Amazônico e interação com o Oceano Atlântico em sua extensa Planície Costeira e o Clima Tropical Úmido. Apresenta ambientes com características de intervenção antrópica ímpar, o que o particulariza em vários processos: ambiental, cultural, social e econômico. Estas características podem ser identificadas na região geográfica (objeto deste estudo) compreendida entre a foz do Rio Araguari à foz do Rio Amapá Grande – Município de Amapá – AP (Silva, 2003).

A geologia da área é composta pelo Grupo Barreiras de origem Terciária, e Depósitos de Planície Flúvio-Estuarina, Depósitos de Planície Flúvio-Marinho e Depósitos Lacustres de origem Quaternária (Silveira, 1998).

A geologia da região do Médio Araguari é formada, principalmente, por rochas metamórficas, metassedimentos, gnaiss, granitóides, granulito, migmatito e ortoanfibolito (dentre outras), conforme pode ser visualizado na Figura 07, que mostra a formação geológica na região de Porto Grande, município situado na parte central do trecho pesquisado (Barbara, 2005).

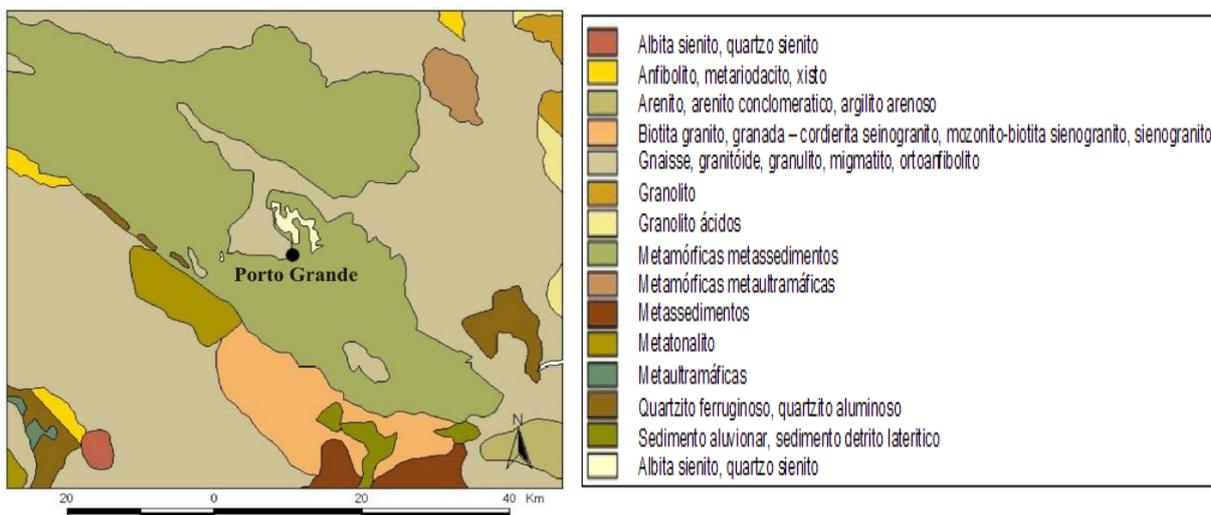


Figura 5- Mapa geológico da região do Médio Araguari

Fonte: Adaptada - ARCVIEW GIA versão 3.1 (2006).

4.2.3 Geomorfologia

A área de estudo compreende duas unidades geomorfológicas como sejam: Planaltos Residuais do Amapá; Colinas do Amapá.

Segundo Silveira (1998) os planaltos residuais do Amapá constituem um conjunto de maciços residuais topograficamente elevados que, na área de estudo, recebem a denominação de Serra do Navio. Estes maciços residuais são caracterizados por dissecação intensa que origina um conjunto de cristas, picos e topos aplainados, que constituem os testemunhos do Pediplano Pliocênico.

As Colinas do Amapá corresponde a um extenso pediplano pleistocênico, com declividade regional para leste esculpido predominantemente em terrenos pré-cambrianos e subordinadamente em terrenos sedimentares terciários. As altitudes variam geralmente entre 150 m e 200 m. O pediplano é dissecado por drenagens com padrão predominantemente dendrítico, originando colinas com vales encaixados e ravinamento nas vertentes.

Nas áreas mais elevadas, que circundam os maciços individuais a dissecação é mais acentuada. Estas feições mudam gradativamente em direção ao litoral, sendo substituídas por colinas de topo aplainado, seccionadas por vales alargados e pouco aprofundados. Na superfície pediplanada ocorrem na direção NNW-SSE, cujos topos estão cortados por aplainamento.

O estado do Amapá faz parte do Craton Amazônico (Escudo das Guianas) representado por rochas pré-cambrianas orientadas preferencialmente nas direções NW-SE e WNW-SE. O Escudo das Guianas comporta domínios metamórficos distintos separando imenso afloramento de rochas granitóides. A coluna estratigráfica do Estado é representada por uma unidade basal, o Complexo Guianense, formado por rochas metamórficas, das fácies anfibólica e granulítica, gnaisses, migmatitos, granitos e quartzo dioritos. Sequências metamórficas das fácies xisto-verde e anfibolitos, denominadas Grupo Vila Nova, encobrem a unidade basal e são representadas por xistos, anfibolitos, quartzitos, itabiritos, etc. Associados cronologicamente a este Grupo ocorrem maciços intermediários, básicos e ultrabásicos (Lima et. al. 1991).

Durante o Permo-Trássico instalou-se enxame de diques básicos toleíticos denominados de Suíte Intrusiva Cassiporé, tidos como reflexo da abertura do oceano Atlântico (Costa et al., 1991).

No terciário ocorreu uma sedimentação de pelitos, psamitos e psefitos (formação barreiras) na forma de uma estreita faixa de direção aproximada N-S. No final do Terciário, toda a faixa costeira do Amapá recebeu a sedimentação do Grupo Barreiras, constituído por sedimentos areno-argilosos, arenosos, argilo-siltosos e conglomeráticos, em sistemas de leques aluviais e lacustres, mostram, no entanto, que os sedimentos do Grupo Barreiras podem ter uma influência marinha rasa marcante (Silveira, 1998).

O Quaternário é representado por uma banda de largura variável que se estende de Macapá para o norte até a foz do Oiapoque. Forma extensas planícies de inundação com sedimentação mista, marinha e fluvial (Silveira, 1998).

Do ponto de vista geomorfológico, o estado do Amapá apresenta duas grandes superfícies de aplainamento (RADAM, 1974): Pediplano Plioceno e Pediplano Pleistoceno e a Planície Costeira. No Estado do Amapá são identificados cinco compartimentos morfoestruturais, submetidos atualmente a retrabalhamento por processos erosivos (Boaventura, 1974). Essas unidades compreendem os Planaltos Residuais do Amapá; Planalto Rebaixado da Amazônia; Colinas do Amapá; Depressão Periférica do Norte do Pará e Planície Flúvio Marinha Macapá-Oiapoque, (Lima et al. 1991) definiram uma nova classificação, também com cinco Unidades morfoestruturais, representadas pela Planície Costeira do Amapá; Planalto rebaixado da Amazônia; Planalto da Bacia da Amazônia; Planalto Dissecado Jari-Araguari e; Planalto Dissecado do Norte do Amapá (Figura 08).

A Planície Costeira corresponde à faixa de ocorrência de sedimentos quaternários, de ambiências fluvial, flúvio-lacustre e flúvio-marinha; a extensa faixa de platôs que identifica o Planalto Rebaixado da Amazônia constitui-se pelos sedimentos continentais dos Grupos Barreiras e Alter do Chão, este último já de idade cretácea e de grande importância econômica por causa dos seus depósitos de caulim e bauxita. O interior do estado eleva-se pelas zonas serranas das serras do Tumucumaque-Iratapuru, integrantes do Planalto Dissecado Jari-Araguari relativos ao cinturão de cisalhamento Tumucumaque e a contraparte situada ao norte, que corresponde ao Planalto Dissecado do Norte do Amapá esculpido nas litologias do núcleo Arqueano Oiapoque (Lima et al. 1991).

A Planície Flúvio-Marinha Macapá-Oiapoque (Planície Costeira) foi subdividida em dois domínios morfológicos segundo suas características genéticas, tendo como referência o rio Flechal. Ao norte, essa unidade foi considerada como sendo de origem predominantemente marinha, enquanto que ao sul, os processos fluviais foram considerados determinantes na sua evolução (Silveira, 1998).

Os rios mais importantes do Estado são os rios Araguari, que drenam a área central do estado desembocando no canal norte da foz do rio Amazonas; o rio Oiapoque e seus tributários da margem direita, e os rios Uaçá, Cassiporé, Cunani, Cauçue e Amapá Grande que vão diretamente ao mar; o rio Vila Nova, o Jari e o Paru que deságuam no Amazonas.

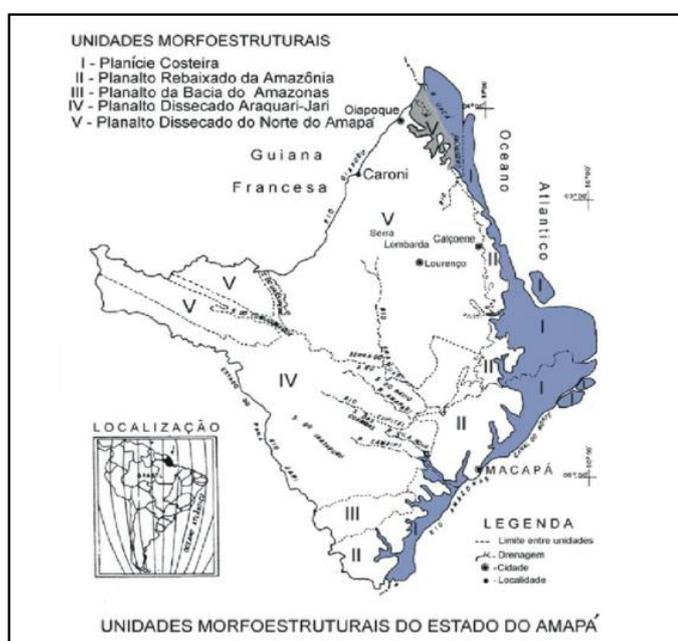


Figura 6 - Unidades morfoestruturais do estado do Amapá.

Fonte: Modificado de Boaventura e Narita (1974), Lima et al.(1991) apud Silveira (1998).

4.2.4 Hidrografia

A Bacia Hidrográfica do rio Araguari é a maior e mais importante do Estado, com aproximadamente 42.710 km² de área. A bacia hidrográfica ocupa cerca de um terço da área total do Estado, e extensão de aproximadamente 300 km, desde sua nascente, na Serra do Tumucumaque, até a sua foz, no Oceano Atlântico (Barbara, 2005).

De maneira geral, essa bacia hidrográfica possui forma geométrica muito irregular, principalmente nas proximidades de sua foz, no Oceano Atlântico. O relevo local é plano, exceto pela presença de algumas regiões colinosas revestidas por florestas pluviais que aparecem junto à borda ocidental da planície de escoamento. No inverno surgem áreas inundáveis que formam lagos intercomunicáveis, o que proporciona uma paisagem de pântano em alguns locais. Na região denominada de Baixo Araguari, a predominância é de uma planície flúvio-marinha, ocorrendo a presença de macrófitas aquáticas nas margens do canal principal do manancial (PROVAM, 1990).

O rio Araguari nasce ao sul da serra Lombarda e Tumucumaque, a cerca de 200 metros de altitude. Ele é formado pela confluência dos rios Mururé e Amapari, recebendo como afluentes os rios Tapiti, Mutum, Tajauí, Santo Antônio, Falsino, Jacinto e Aporema; os igarapés do Eduardo, da Ribeira, Manuel e do Cordeiro; e o córrego Tracajatuba. Sua extensão aproximada é de 498 km, sendo que o mesmo é dividido em três trechos: (1) curso superior ou Alto Araguari (132 km); (2) médio curso ou Médio Araguari (161 km), região também conhecida como Paredão, onde se encontra localizada a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes; e (3) curso inferior ou Baixo Araguari (205 km), onde o número de meandros aumenta, diminuindo sua velocidade de escoamento. A declividade média do canal é de 0,50 m/km (PROVAM, 1990, Cunha, 2003).

Três municípios estão localizados nas margens do Médio Araguari, sendo eles: Porto Grande, Ferreira Gomes e Cutias, com populações estimadas, no ano de 2005, de 14.675, 4.321 e 4.285 habitantes, respectivamente. Próximo de Porto Grande ocorre à confluência do Rio Araguari com o rio Amapari onde, a partir de então, o primeiro inicia seu trajeto pela planície costeira do Amapá, até desembocar no Oceano Atlântico. As vazões máxima e mínima medidas pela estação fluviométrica de Porto Platon até novembro de 2005 foram de 3.857,00 m³/s, em 7 de abril de 1974, e 121,00 m³/s, em 10 de dezembro de 1976, respectivamente (PROVAM, 1990, IBGE, 2006).

A área de drenagem da bacia do rio Araguari é de 30.850 km², em Ferreira Gomes, junto à ponte da BR-156 (rodovia federal que une Macapá ao Oiapoque). O rio Araguari, situado à jusante da localidade de Ferreira Gomes, percorre uma vasta planície inundável, sob influência do regime das marés e “pororocas”, fenômeno típico da região.

As águas do Rio Araguari possuem uma tonalidade amarelo-barrenta, com considerável predominância de matéria orgânica, uma vez que, na maioria dos rios amazônicos, a presença de substâncias húmicas é bem acentuada (ANA, 2010). Esse rio sofre os efeitos das marés oceânicas até a altura do município de Cutias, numa cota média de variação de cerca de 0,50 m. No período das chuvas, principalmente, o Araguari vivencia o fenômeno da “pororoca”, quando suas águas se opõem à maré oceânica, fazendo elevar seu nível até o momento em que ocorre a quebra brusca do equilíbrio até então mantido entre esses dois volumes hídricos. Na maré alta, a onda formada pela água do mar avança sobre o rio, invertendo sua correnteza. O movimento dessa onda provoca elevados ruídos que podem ser ouvidos a longas distâncias (PROVAM, 1990).

4.2.5 Vegetação

A vegetação que compõe o setor Atlântico do estado Amapá é predominantemente de manguezais com domínios de extensos siriubais (*Avicennia germinans*), com árvores em torno de 30 metros de altura, formando bosques maduros e abertos, além de duas espécies de *Rhizophora* (*R. mangle* e *R. harrisonia*) e *Laguncularia racemosa*. Associadas aos bosques de manguezais, com porte arbóreo a herbáceo, encontram-se as espécies de floresta de várzea como mututi (*Pithecarpus amazonicus* Huber e *P. officinalis* Jacq.), verônica (*Dalbergia monetaria* L.f. e *D. ecastophylla*), aturiá (*Macherium lunatum* L.f.), açaí (*Euterpe oleracea*), taboca (*Guadua glomerata*), entre outras (Costa-Neto et al. 2003).

Apresenta uma extensa área de campos periodicamente inundáveis e inundados, compostas de espécies herbáceas (como Gramineae, Cyperaceae, Lentibulariaceae, Alismataceae, Nymphaeaceae, e outras) e arbustivas (como Annonaceae, Arecaceae e Leguminae). No médio e baixo curso dos rios que deságuam no setor Atlântico como Amapá e Araguari podem ser encontrados florestas de várzea com e sem domínio de palmeiras (Costa-Neto, 2004).

4.3 EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO NA SERRA DO NAVIO

O município de Serra do Navio situa-se no Amapá, a aproximadamente 0° 55' norte e 52° 05' oeste, às margens do rio Amapari (Figura 03), o qual faz parte da bacia hidrográfica do rio Araguari, que drena diretamente ao mar. O minério de manganês ali produzido foi escoado por 192 km por estrada de ferro, até o porto de Santana, situado na margem esquerda do canal Norte do rio Amazonas. A população estimada em 2003 era de 3724 habitantes e a área é de 7757 km², o que resulta numa densidade demográfica de 0,48 hab/km². A cidade foi criada inicialmente para abrigar os funcionários da ICOMI - Indústria e Comércio de Minérios, que firmou contrato de exploração do manganês amapaense por 50 anos, ou seja, até 2003. Entretanto, como esgotou a reserva antes do tempo previsto, a empresa deixou o local. (Scarpelli, 2003).

A mercantilização do minério das jazidas de manganês na Serra do Navio, no então Território Federal do Amapá, teve início na década de 50. Naquela época o manganês era considerado um minério estratégico, pois, em plena “guerra fria”, a antiga União Soviética, detentora das maiores reservas mundiais de manganês — insumo indispensável à indústria do aço — havia suspenso a sua exportação; as reservas da Serra do Navio ganharam enorme importância. Elas foram inclusive declaradas, em setembro de 1946, por decreto-lei do presidente Eurico Gaspar Dutra, como “reserva nacional”, cujo estudo e aproveitamento deveriam ser feitos pelo Governo do Território Federal do Amapá sob a orientação do Conselho Nacional de Minas e Metalurgia (Monteiro, 2005).

Com o início das atividades da ICOMI, o Brasil passou a ser o quarto maior produtor de minério de manganês, sendo superado apenas pela então União Soviética, pela África do Sul e pela Índia. A produção da ICOMI nos primeiros anos de operação oscilou em torno de 700 mil toneladas anuais e destinou-se basicamente ao abastecimento do mercado norte-americano (Monteiro, 2005).

A valorização do manganês, que envolveu sua extração, beneficiamento e a transformação primária de pequena parcela do minério, requereu assim, a movimentação e dispersão de grande quantidade de matéria, a produção de significativo volume de rejeitos e a exaustão das diversas minas da Serra do Navio (Monteiro, 2003).

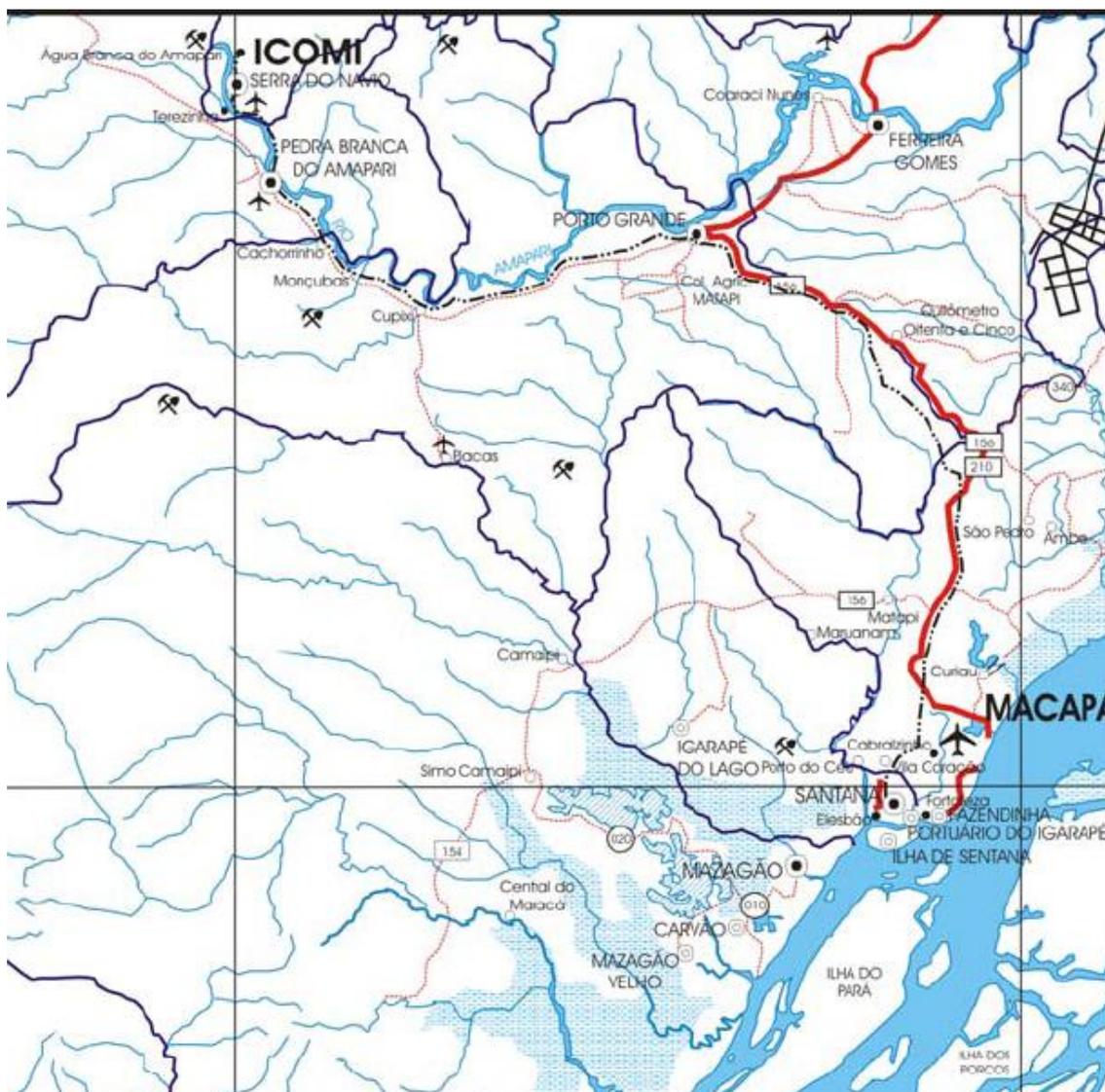


Figura 7 - Mapa com a localização do município da Serra do Navio.

Estima-se que em 41 anos de operação para a mercantilização de 33,2 milhões de toneladas de óxido de manganês e de 926 mil toneladas de carbonato foi necessária a movimentação de mais de 123 milhões de toneladas de material estéril, o beneficiamento de mais de 61 milhões de toneladas de minério e a geração de mais de 26 milhões de toneladas de rejeitos (Monteiro, 2003).

Durante o processo de beneficiamento, as impurezas contidas no minério bruto eram reduzidas, resultando em um produto cuja composição química enquadrava-se nos padrões indicados na Tabela 02.

Tabela 2. Composição média do minério de manganês metalúrgico comercializado pela ICOMI.

Elemento	Percentual mínimo	Percentual máximo
Mn	49,5% ^(a)	50,0%
Fe	4,5%	5,0%
SiO ₂	2,0%	3,0%
Al ₂ O ₃	5,0%	6,0%

A ICOMI (1998:4), entretanto, aponta que o teor médio do produto comercializável oscilava em torno de 48,5%, embora fossem feitas partidas com teores maiores.

Fonte: Gonçalves, (1976:141).

Constatado que os rejeitos contendo arsênio atingiram águas do nível freático e igarapés como decorrência da disposição inadequada dos rejeitos produzidos pelo processo de ustulação, tanto da pelotização quanto da sinterização do minério de manganês a ICOMI foi multada em R\$ 52 milhões. A empresa recorreu à justiça contra a multa e ainda não existe decisão final do judiciário.

As rochas de serra do navio têm idade Precambriana, com aproximadamente 1,8 bilhões de anos (Figura 04). Ali ocorrem gnaisses e granitos, lavas máficas metamorfasadas em anfibolito, e duas unidades de sedimentos finos a químicos metamorfasadas em xistos e mármore. Na unidade inferior de sedimentos há níveis de mármore manganésíferos (Scarpelli, 2003).

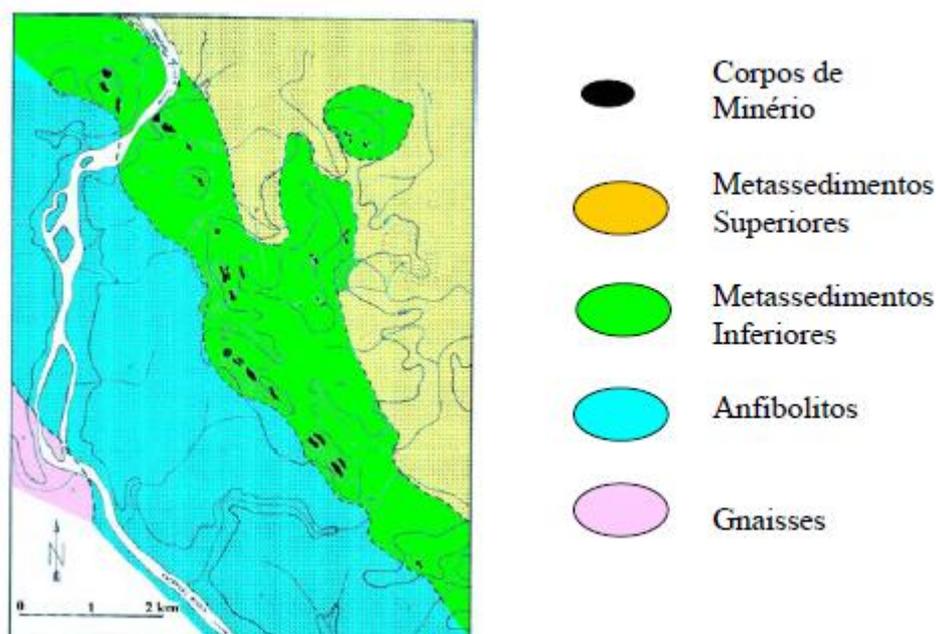


Figura 8 - Mapa geológico de Serra do Navio, mostrando posicionamento dos afloramentos do minério manganésífero em cristas topográficas.

Devido à pluviosidade, às altas temperaturas e à acidez das águas, essas rochas estão intensamente decompostas, com a alteração chegando a mais de 100 m de profundidade. Nessas condições, durante a alteração muitos elementos químicos das rochas, como o potássio, o sódio, o cálcio e outros, são removidos com a água de subsolo. Outros elementos, como o ferro, o alumínio e o manganês, após dissolução inicial permanecem em forma solúvel ou formam colóides e cristalizam e ou consolidam como óxidos e hidróxidos, num processo que chega a formar, respectivamente, carapaças de laterita, de bauxita e de minério de manganês. Vários elementos, como o arsênio e o cobalto, são retidos e concentram-se nos óxidos e hidróxidos de ferro e de manganês (Scarpelli, 2003).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados das análises químicas, físico-químicas e elementos químicos realizadas nas amostras de água coletadas no reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes foram divididos em duas populações distintas: Período de estiagem (seco), representado pelas amostras coletadas no mês de outubro de 2008 e setembro de 2009 e Período de elevada precipitação (chuvoso), representado pelas amostras coletadas no mês de fevereiro de 2009 e maio de 2009.

Os resultados foram avaliados em termos estatísticos, através de uma estatística descritiva objetivando realizar uma análise exploratória dos dados, isolando as estruturas e padrões mais relevantes pelo conjunto de dados obtidos no estudo. As amostragens foram realizadas em quatro campanhas permitindo verificar as interações entre os sistemas hidrogeológicos e a variação sazonal sobre as características hidroquímicas dessas águas.

5.1 MAPAS GEOQUÍMICOS

A metodologia geoestatística procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as características estruturais probabilísticas do fenômeno regionalizado, ou seja, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. O método de estimativa básico utilizado é o da *krigagem*. Trata-se de um processo de estimação por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes por uma função denominada *variograma* (Landim, 2002).

A krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. Nessa situação o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado à tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos de interpolação. É entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Dentre os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado

como o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa.

As formas mais usuais são a *krigagem simples* e a *krigagem ordinária* e entre os métodos não lineares destaca-se a *krigagem indicativa*.

No processo básico da krigagem, a estimativa é feita para determinar um valor médio em um local não amostrado. Pode-se, porém, também fazer estimativas baseadas em valores que se situam abaixo ou acima de um determinado nível de corte (cutoff). Este procedimento, estabelecido para vários níveis de corte (percentis e/ou quartis, por exemplo) de uma distribuição acumulada, conduzirá a uma estimativa de vários valores dessa distribuição em um determinado local, cuja função poderá ser ajustada (Landim, 2002).

A interpolação dos valores medidos no campo para toda a área de estudo foi feita com base no estimador de krigagem simples que acompanha o Software SURFER 8.0. Utilizou-se um modelo linear, embora não tenham sido calculados os parâmetros estruturais do variograma, que definem a variabilidade espacial do fenômeno. A *krigagem simples* é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área.

5.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DE METAIS E ESPÉCIES QUÍMICAS

Nos últimos anos têm surgido várias técnicas analíticas para a determinação de elementos em nível de traços ($0,01-100 \mu\text{g L}^{-1}$) e ultra traços ($< 0,01 \mu\text{g L}^{-1}$). Apesar de todos os benefícios alcançados, nenhuma técnica analítica resolve todos os problemas levando-se em conta os diferentes tipos de matrizes.

As baixas concentrações de metais em águas naturais necessitam de determinação por métodos instrumentais. Os métodos fotométricos, às vezes em combinação com extração, são técnicas clássicas e baratas, no entanto, essa técnica só pode ser usada em análise para de águas comparativamente poluídas. Métodos de absorção atômica são mais largamente usadas, mas só é possível aplicar em amostras onde as concentrações excedem $50 \mu\text{g. L}^{-1}$. Métodos espectrofotométricos de emissão atômica são capazes de determinar um grande número de elementos simultaneamente. (Chapman, 1996).

As técnicas instrumentais analíticas comumente utilizadas para a determinação de elementos em nível de traços são a espectrometria de absorção atômica com chama (AAS), espectrometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica (ou forno de grafita) (GFA-AAS), a espectrometria de absorção de fluorescência atômica (FAAS), a espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio (ICP-OES), a espectrometria de massas com plasma de argônio (ICP-MS), a análise por ativação neutrônica (NAA), espectrometria de emissão de raios X emitida por partículas (PIXE), espectrometria por fluorescência de raios - x (XRF), a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), cromatografia iônica (IC) e métodos polarográficos, voltamétricos e potenciométricos (Clement et al, 1995 *apud* Lemes, 2001).

Existe um amplo leque de métodos e técnicas aplicados para a determinação de metais e elementos-traço em água e matriz ambiental. Neste trabalho fez-se uso de uma técnica multielementar muito sensível para que o objetivo fosse atingido: a Espectrometria de massa com fonte de plasma de Argônio induzido (ICP-MS).

5.3 ESPECTROMETRIA DE MASSA COM FONTE DE PLASMA DE ARGÔNIO INDUZIDO (ICP-MS).

O ICP-MS é uma ferramenta versátil e largamente usada na identificação dos elementos presentes em diversas amostras. Suas principais aplicações são na geoquímica, área ambiental, biológica e de alimentos, e isto se deve aos baixos limites de detecção, a seu alto grau de seletividade, a sua razoável precisão e exatidão, à rápida detecção das razões isotópicas, ao pequeno volume de amostra, além é claro, à capacidade multielementar. Cerca de 90% dos elementos podem ser determinados com limite de detecção na faixa de 0,1 a 0,001 μL (ppb) em soluções aquosas (Veiga *apud* Santos, 2007).

A técnica de ICPMS é baseada na separação e posterior contagem de íons formados quando o aerossol, resultante da nebulização de uma solução, atravessa um plasma de argônio. É uma técnica multielementar e extremamente sensível, sendo a sensibilidade para cada elemento essencialmente uma função de sua primeira energia de ionização. A separação dos íons é feita eletronicamente, através da razão m/z , onde m é a massa do íon e z a sua carga. Para evitar interferências, sempre que possível procura-se selecionar isótopos do elemento cuja razão m/z não seja sobreposta pela razão do isótopo de algum outro elemento. Assim, quando a formação de íons monovalentes é

otimizada, obtém-se, após a detecção, um espectro relativamente simples. Essa otimização é conseguida pelo controle da temperatura do plasma, dependente do potencial da radio - frequência aplicada a ele e pelo controle da temperatura do plasma, dependente da potência vazão do gás de nebulização.

O plasma é definido como o alto estado de energia de um gás no qual praticamente todos os átomos e moléculas são ionizados. Para iniciar o protoplasma, um fluxo de gás é semeado com elétrons livres oriundos de uma descarga elétrica de alta tensão de enorme potencial capaz de vencer a resistência dielétrica do gás. O plasma é sustentado por meio de campos elétricos e magnéticos flutuantes produzidos pelo gerador de onda de rádio frequência (RF) da ordem de 40 MHz que é produzida dentro de uma bobina de carga. Estes campos acoplam as energias no plasma por meio de aceleração de elétrons livres da periferia para uma zona interna da bobina de carga. Esta zona é conhecida como a região de adição de energia. A energia é então transferida para outra espécie de plasma por meio de colisão. O gás de argônio atinge uma temperatura de 6000 a 8000 K na porção central do plasma, a uma pressão de 1,25 bar. Devido ao alto estado de energia do plasma, as moléculas injetadas dentro da tocha são quebradas em seus constituintes elementos químicos, que por sua vez, são ionizadas.

5.3.1 Componentes de um ICP-MS

Um espectrofotômetro de massa com fonte de plasma induzido (ICP-MS) é composto por cinco partes principais: sistema de introdução de amostras, ICP (fonte de íons), interface (focalização), sistema analisador de massas (quadropolo) e sistema de detecção de íons. Na Figura 09 está à representação de um ICP-MS convencional (Santos, 2007).

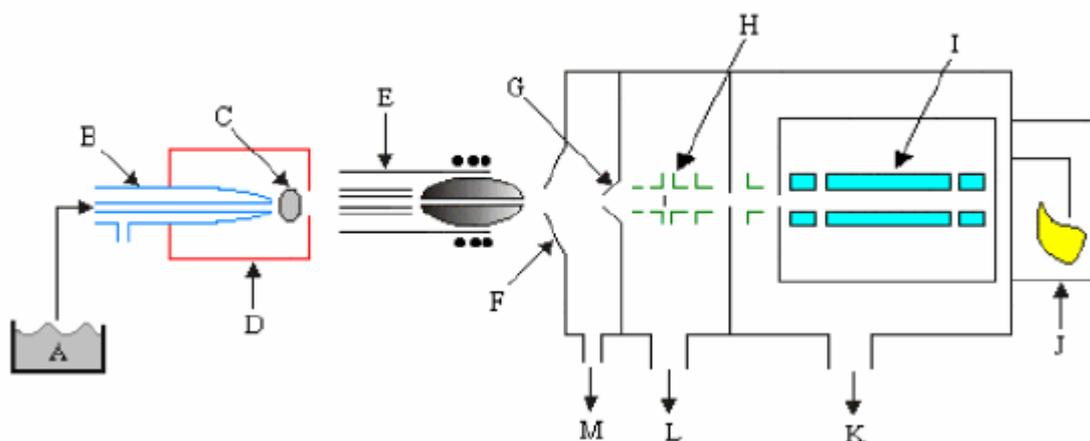


Figura 9 - Esquema de um ICP-MS convencional, onde A é a amostra líquida; B, o nebulizador; C, o aerossol; D, a câmara de nebulização; E, a tocha de ICP; F, o cone amostrador; G, o cone skimmer; H, as lentes iônicas; I é o analisador de massa; J, o sistema de detecção; K e L são bombas de vácuo turbo molecular (alcançam vácuo de 5×10^{-9} barr e $< 1 \times 10^{-7}$ barr, respectivamente) e M é a bomba de vácuo mecânica (2×10^{-3} barr).

1. Nebulizador - O princípio de operação de um nebulizador pneumático é baseado na quebra de uma corrente de solução de amostra por meio de um fluxo de gás de alta velocidade produzindo “spray” de minúsculas gotas ao redor de 10 mm de diâmetro. “Uma pequena pressão positiva na câmara de spray” empurra o aerossol para a tocha;

2. Bomba peristáltica - A bomba peristáltica é usada para fornecer um fluxo estável de solução de amostra para o nebulizador e para remover alguma solução condensada na câmara de “spray”;

3. Câmara de “spray” - A câmara de “spray” padrão, tipo “Scott Double – Pass”, por exemplo, é fabricada em quartzo. Outros materiais tais como PTFE (tipo de teflon) são requeridos se as soluções são altamente corrosivas como o HF, por exemplo. A câmara de “spray” é provida com uma pequena fenda que deixa passar apenas as gotículas menores que 10 mm de diâmetro para o plasma, o que corresponde em média de 0,1% da solução total pulverizada. Uma camisa de água refrigerada é utilizada para remover o excesso de água. A remoção deste excesso de água é importante, pois, caso contrário, há uma grande produção de íons de oxigênio dificultando a análise no ICP-MS;

4. Quadrupolo (QP) - A Figura 10 mostra o desenho esquemático de lentes de quadrupolos. Trata-se de dois pólos positivos e de dois pólos negativos posicionados simetricamente e flutuantes na frequência de rádio (RF - $\sim 1,2$ MHz). Os íons que forem acelerados dentro deste campo elétrico mover-se-ão de forma helicoidal e somente sairão deste setor as massas que forem moduladas pelo RF. A relação entre a massa (M), a frequência (f), o campo e a velocidade (v), que é proporcional à tensão de aceleração.

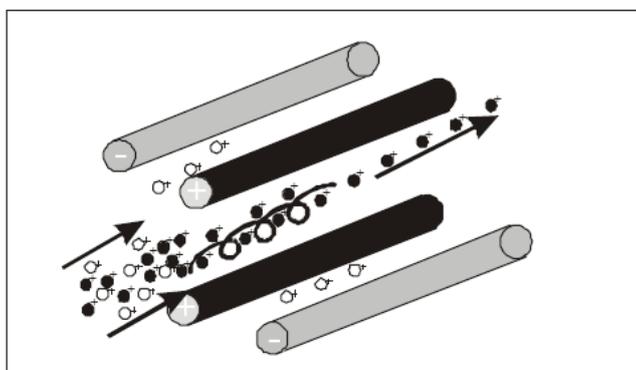


Figura 10 - Quadrupolo – íons de círculos fechados foram modulados por campo elétrico flutuante (RF), enquanto que os íons de círculo aberto não foram modulados e acabam se chocando contra parede.

Os íons formados são coletados e transferidos ao sistema de separação do instrumento. A coleta é feita pela passagem dos íons através do orifício de dois cones, distantes um centímetro um do outro, sendo a região entre eles, a interface, mantida a uma pressão de aproximadamente um torr. A temperatura na interface é bem mais baixa, ficando situada entre 100 e 200 °C. A geometria e o arranjo dos cones, amostrador e Skimmer são projetados de forma a descartar uma parte substancial do material vindo do plasma e, assim, evitar a saturação do sistema (Santos, 2007)

Os íons que passaram através do orifício do Skimmer têm energias cinéticas, trajetórias, velocidades e massas diferentes e seu feixe contém fótons e átomos neutros. Portanto, o feixe deve ser focalizado e os fótons e átomos neutros removidos antes de

ser submetido à separação de massas. O feixe focalizado é transferido ao separador ou analisador de massas, que funciona em um vácuo na faixa de 10^{-5} torr e consiste de barras paralelas, nas quais é aplicado um potencial de rádio - frequência e, um potencial de corrente contínua (duas a duas). A variação desses potenciais leva a situação, onde somente íons com uma determinada razão m/z têm uma trajetória homogênea e conseguem atravessar o quadrupolo. O conjunto dessas situações, que ocorrem em frações de milissegundos, permite uma análise seqüencial eficiente e muito rápida. Cada razão m/z separada atinge o detector, onde é contada sob a forma de pulsos elétricos de curtíssima duração, que são amplificados para produzir o sinal medido, intensidade, para cada elemento de interesse (Santos, 2007).

Antes de iniciar qualquer um desses procedimentos, é preciso selecionar os isótopos que serão medidos e fixar os parâmetros, além de estabelecer as condições de operação do plasma. As condições operacionais do plasma devem ser otimizadas de forma a se obter melhor relação entre sinais maiores e menores taxas de formação de óxidos e íons divalentes. Isso é conseguido variando-se a potência da rádio - frequência aplicada ao plasma, à vazão do argônio de nebulização e a escolha adequada da distância plasma/amostrador.

A calibração quantitativa baseia-se em curvas elementares de calibração, de modo geral construídas a partir de quatro soluções de calibração e de um branco. Normalmente, as retas obtidas têm coeficientes de correlação superiores a 0,995. Os resultados obtidos tendem a serem confiáveis, os problemas com a exatidão geralmente são decorrentes da digestão da amostra ou de interferências por íons divalentes e poliatômicos.

5.3.2 Introdução de amostras no ICP-MS

O sistema típico de introdução de amostras consiste de uma bomba peristáltica, um nebulizador e uma câmara de nebulização. A amostra é bombeada até o nebulizador que transforma a amostra líquida em um aerossol fino. O aerossol chega à câmara de nebulização que separa as gotas maiores das menores e um fluxo de argônio carrega a amostra já vaporizada até a tocha do ICP, onde a amostra é ionizada (Giné-Rosias, 1999, Montaser, 1998). A Figura 11 mostra o esquema de um sistema de introdução de amostra.

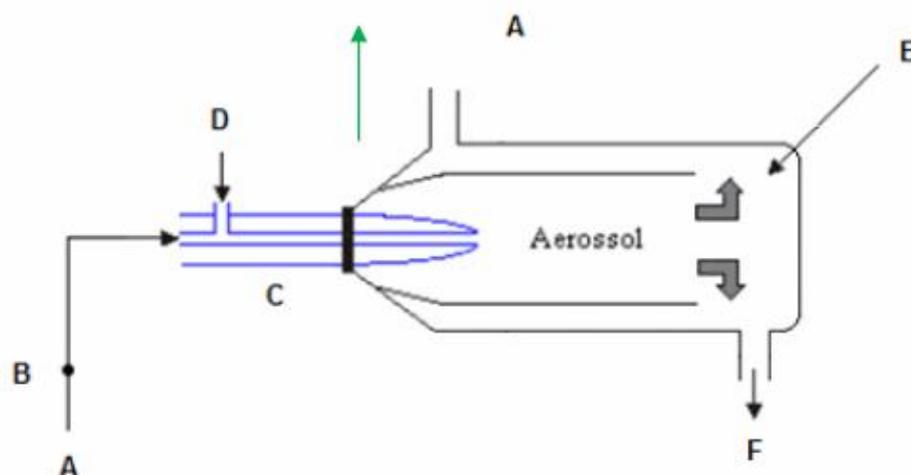


Figura 11 - Sistema de introdução de amostra em ICP-MS: A) Amostra B) Bomba peristáltica. C) Nebulizador D) Gás de arraste. E) Câmara de nebulização. F) Descarte

Fonte: (Santos, 2007 com modificações).

5.3.3 Fonte de ionização do ICP-MS (Tocha e plasma)

A Figura 12 mostra a temperatura em varias partes do plasma. Pelo tempo que os átomos das amostras levam para atingir o ponto de observação. Como conseqüência, a atomização é mais completa, e surgem menos problemas de interferências químicas. Surpreendentemente, os efeitos de interferências pela ionização são pequenos, ou inexistentes, provavelmente devido à concentração muito grande de elétrons provenientes da ionização de argônio quando comparada com a resultante da ionização dos componentes da amostra. (Skoog, 2002).

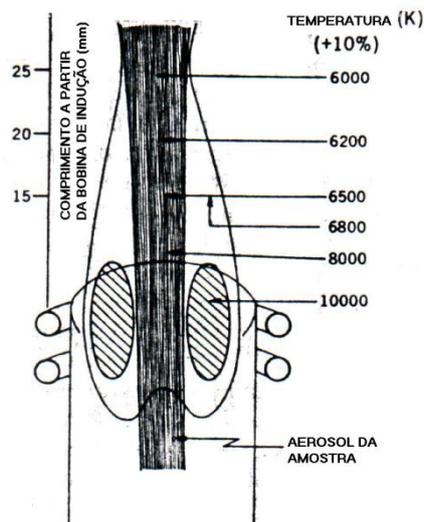


Figura 12 - Temperatura encontrada em plasma induzido.

O plasma é formado na tocha e nele a amostra sofre rapidamente os processos de dessolvatação, vaporização, atomização e ionização (Figura 13). A tocha consiste de três tubos concêntricos para o transporte de gás (Figura 14). O fluxo de gás externo evita o superaquecimento protegendo as paredes da tocha. O fluxo auxiliar introduzido no tubo intermediário é utilizado para estabilizar o plasma durante a introdução de amostra. O gás interno também chamado de gás de arraste transporta a amostra nebulizada até o plasma (Montaser, 1998).

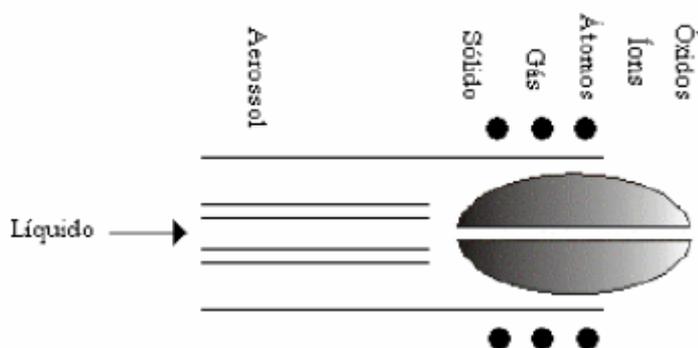


Figura 13 - Representação dos processos que ocorrem no plasma

Fonte: (Giné-Rosias, 1999).

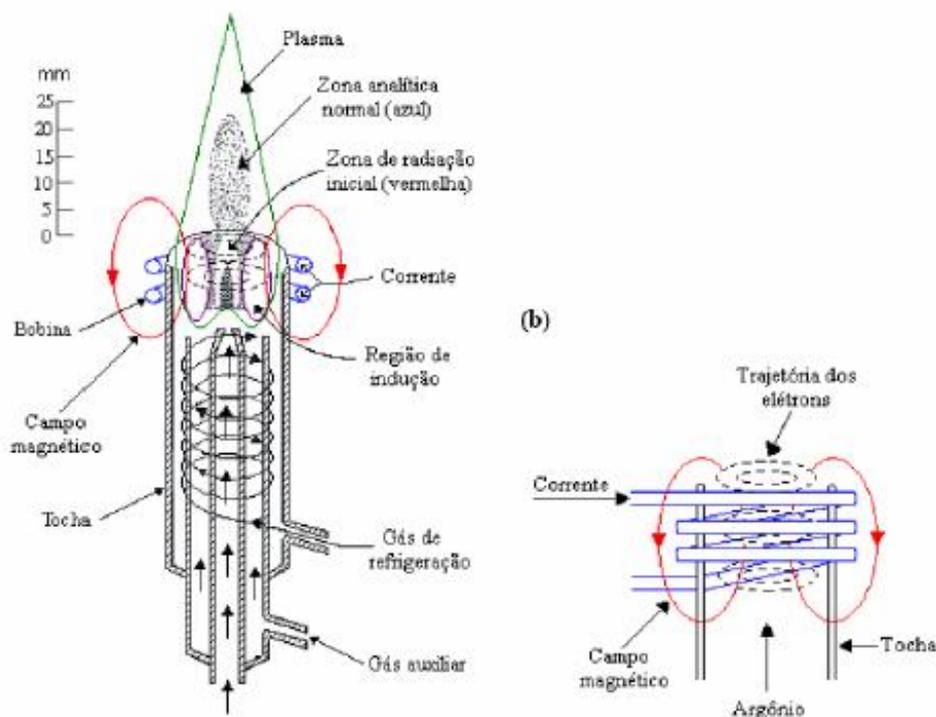


Figura 14 - Esquema de uma tocha. Representação: a) Dos três tubos concêntricos, acoplados a uma bobina de indução de um gerador de RF, b) Do campo magnético

Fonte: (Jarvis et al. 1992).

5.3.4 Interface

O ICP produz, eficientemente, íons mono carregados para o espectrômetro de massas (MS). Para transportar os íons para o MS, é usada uma interface com bomba de vácuo de múltiplo estágio. Os íons são extraídos do plasma, que se encontram a uma pressão atmosférica, para o espectrômetro de massas à baixa pressão, através de um cone de amostragem de platina que se encontra refrigerado (Santos, 2007).

O orifício deste cone tem aproximadamente 1,0 mm de diâmetro. Na região de baixa pressão atrás do cone ocorre expansão do gás, antes, uma fração dos íons passa através de outro cone denominado *Skimmer*, e a maior parte do Ar(g) é bombeada para fora. Os íons são focalizados diretamente no caminho do analisador de massas usando lentes que são eletrodos submetidos a diferentes voltagens (Figura 15). Nas lentes as partículas neutras são eliminadas pelas bombas de vácuo. (Jarvis, 1992).

A principal função da interface é reduzir a pressão e a densidade do feixe, minimizando a perda de íons. As lentes melhoram a sensibilidade e limites de detecção instrumental. (Santos, 2007).

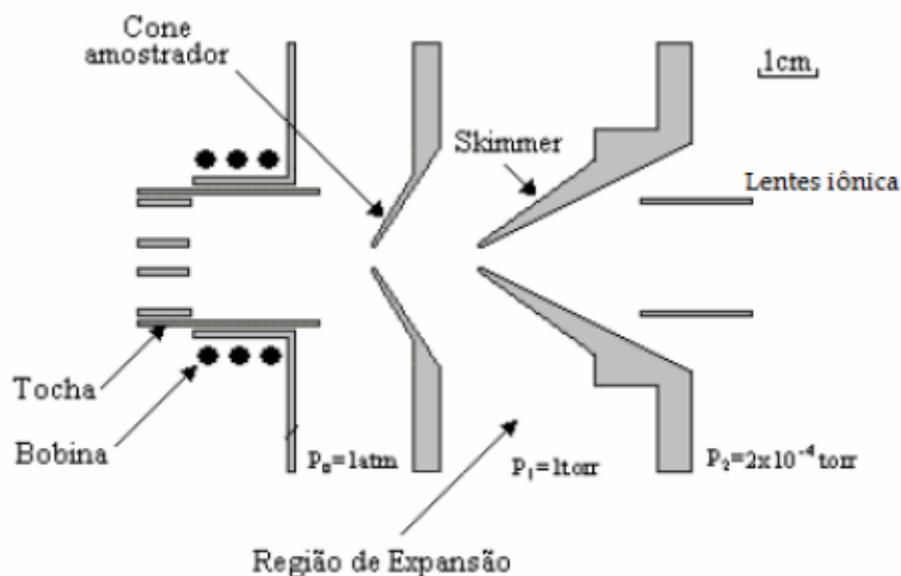


Figura 15 - Configuração do cone de amostragem, do estágio de expansão e do cone Skimmer

Fonte: (Giné-Rosias, 1999).

5.3.5 Analisador de massas quadrupolar.

Um analisador quadrupolar é composto por quatro hastes condutoras paralelas mantidas numa configuração duas a duas (Figura 16). As hastes opostas são conectadas eletricamente, sendo um par ligado ao lado positivo de uma fonte de corrente contínua (FCC) e outro ligado ao terminal negativo de uma fonte de corrente alternada (CA), estabelecendo assim, um campo quadrupolar bidimensional no plano x-y. Os íons que entram no espectrômetro são acelerados pelo potencial aplicado nos cilindros, de 5 a 10 Volts, e viajam na direção z (Montaser, 1998, Skoog, 2002).

A seletividade do filtro quadrupolar é estabelecida variando as magnitudes das voltagens CA e FCC simultaneamente de forma que sua razão seja mantida constante para cada par de hastes. A variação das voltagens provoca um movimento oscilatório do feixe de íons nas direções x e y . A dispersão do movimento depende da magnitude dos campos. Esta é uma propriedade da razão massa/carga (m/z) dos íons individuais. Portanto, íons com uma razão m/z específica reagirão igualmente em relação ao potencial elétrico imposto pelo arranjo quadrupolar (Skoog, 2002).

Normalmente, um instrumento quadrupolar consegue separar espécies que diferem por menos de uma unidade de massa (Skoog, 2002).

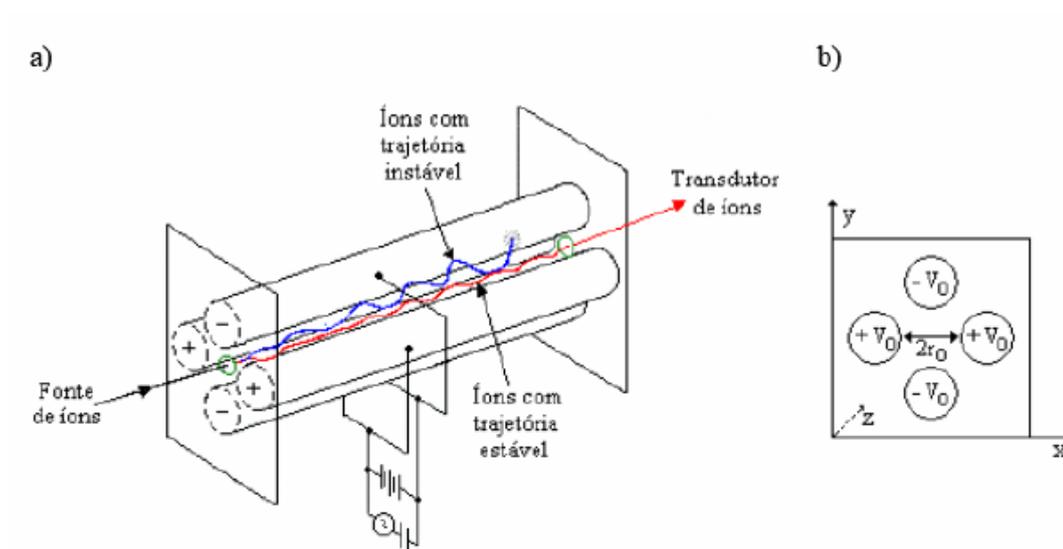


Figura 16 - Esquema de um analisador de massas quadrupolar. a) movimento dos íons através do campo gerado entre as hastes; b) vista frontal dos cilindros

Fonte: (Skoog, 2002).

5.3.6 Sistema de detecção

A detecção dos íons nos instrumentos mais antigos era feita com uma tela fluorescente. Hoje, as versões mais atualizadas de ICP-MS são dotadas de um sistema de detecção simultânea de íons, tais como o multiplicador de elétrons na qual os íons

que atingem sua superfície ejetam elétrons que, a cada impacto, ejetam mais elétrons formando uma cascata (Skoog, 2002).

5.3.7 Interferências em ICP-MS

O ICP-MS não é livre de problemas, pois durante a análise os metais podem sofrer significativas interferências, as quais podem ser divididas em: interferências isobáricas, interferências de íons de dupla carga, e interferências poliatômicas. A interferência isobárica acontece quando dois elementos possuem isótopos de mesma carga como ^{113}In e ^{113}Cd , ^{115}In e ^{115}Sn , ^{40}Ar e ^{40}Ca . Esta interferência pode ser facilmente corrigida escolhendo para análise outro isótopo livre de superposição isobárica, pois a maioria dos elementos possui mais de um isótopo (Skoog, 2002).

A interferência por íons de dupla carga acontece com elementos com baixo potencial de ionização. O elemento se ioniza duas vezes formando um íon de dupla carga (+2) e conseqüentemente seu espectro aparecerá com metade da massa esperada, podendo gerar perda de sinal e interferência com outros elementos. Este problema pode ser facilmente controlado aumentando a vazão do gás carregador e/ou diminuindo a potência de radio frequência (RF) (Giné-Rosias, 1999).

Recentemente, com o desenvolvimento de ICP-MS com celas de colisão (CCICP-MS) e reação dinâmica (DRC-ICP-MS), a técnica se mostra altamente favorável para a determinação de muitos elementos em matrizes complexas utilizando equipamentos de menor custo (Batista et al. 2009).

A célula de reação dinâmica (DRC) é um acessório que pode ser acoplado ao ICP-MS para reduzir interferências espectrais entre íons e moléculas formadas pela combinação de espécies abundantes no gás do plasma, no solvente e na matriz da amostra, promovendo a reação íon-molécula entre o gás reativo e as espécies do feixe de íons. Assim compostos poliatômicos sofrem transferência de íons e geram compostos que não interferem na análise (Santos, 2007).

5.4 ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM E PERIODICIDADE DAS COLETAS

As coletas para a caracterização das variáveis físicas e químicas da água, foram realizadas entre outubro de 2008 e setembro de 2009. Dentre deste período, realizou-se quatro campanhas trimestrais no reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, assim distribuídas na Tabela 03.

Tabela 3- Período das Campanhas

Campanhas	Período
1 ^a	23.10.2008 à 26.10.2008
2 ^a	11.02.2009 à 16.02.2009
3 ^a	05.05.2009 à 10.05.2009
4 ^a	09. 09.2009 à 15.09.2009

O sistema de estudo foi dividido em treze (13) pontos de amostragem distribuídos ao longo do reservatório.

Os pontos à montante (MCN01, MCN02, MCN03, MCN04, MCN05, MCN06, MCN 07, MCN8, MCN 09, MCN 10, MCN11, MCN12, MCN13) foram escolhidos de modo a se ter uma amostragem representativa de todo o reservatório, considerando as peculiaridades de cada região, suas coordenadas foram admitidas dentro do considerado como área representativa de cada ponto de amostragem. Na Tabela 04 estão os pontos de amostragem e suas respectivas coordenadas em UTM.

Tabela 4 - Pontos de amostragem e suas coordenadas (UTM)

Pontos	Coordenadas (UTM)	
	Latitude	Longitude
MCN 01	103233,145	471198,942
MCN 02		469072,559
MCN 03	101154,622	470076,898
MCN 04	99849,664	471053,438
MCN 05	98947,098	469585,324
MCN 06	98738,405	468407,777
MCN 07	96656,614	469915,855
MCN 08	96957,532	469544,999
MCN 09	94295,725	467356,613

MCN 10	96334,442	467094,065
MCN 11	95502,312	468024,289
MCN 12	95812,362	468732,073
MCN 13	97144,884	468704,357

O ponto mais distante à montante é o MCN09, de cada ponto foram amostrados quatro perfis, no máximo. A coleta foi realizada com auxílio de uma voadeira.

5.5 TRABALHOS EM CAMPO

As amostras de água foram coletadas no reservatório da UHE de Coaracy Nunes utilizando a garrafa coletora do tipo de Van Dorn (Figura 18-a) de 2,5 litros de capacidade, em no máximo quatro profundidades (superfície, dobro do secchi, meio e fundo). Em cada ponto de coleta determinava-se a profundidade máxima com o auxílio de um Eco batímetro (Figura 18-b), partindo daí para a coleta dos perfis de fundo e meio (correspondente a metade da profundidade máxima).

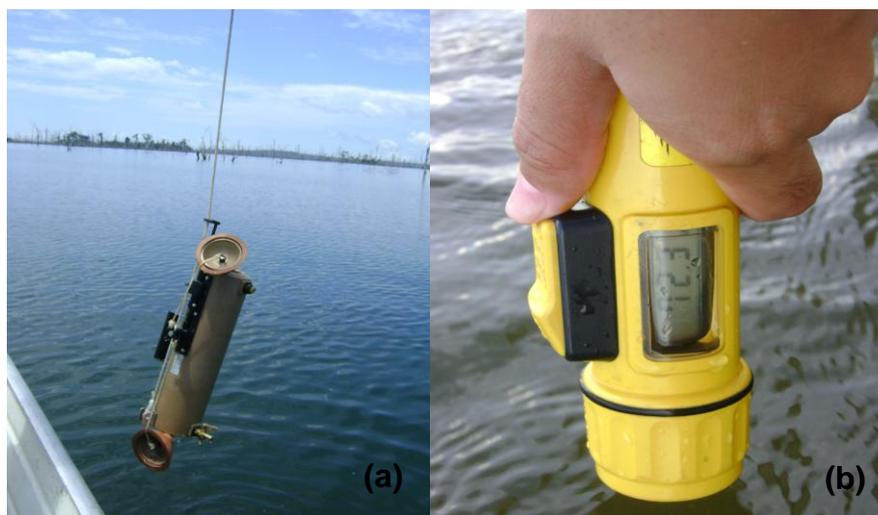


Figura 17 - (a) Garrafa de Van Dorn; (b) Eco Batímetro.

Para se determinar o limite de visibilidade (transparência da água) no reservatório, foi utilizado o disco de Secchi (Figura 19-a), de 0,3 m de diâmetro, pintado de branco e preto e suspenso por uma corda previamente marcada em intervalos de 0,5 m. A partir daí foi determinado o perfil de coleta, dobro do Secchi. As amostras foram acondicionadas em frascos de 50 ml do tipo eppendorf (Figura 19-b).

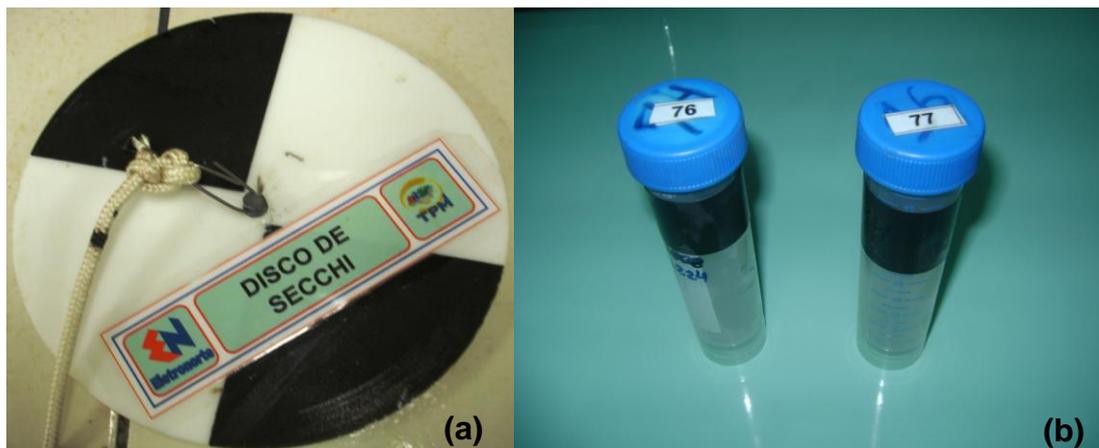


Figura 18 - (a) Disco de Secchi; (b) Frascos de 50 mL do tipo eppendorf.

5.5.1 Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos analisados nas águas do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes foram: Temperatura (T), Condutividade Elétrica, pH. Todos estes parâmetros foram determinados no local da coleta através da utilização de aparelhos portáteis.

O principal interesse do estudo da temperatura é seu papel na estruturação térmica dos corpos d'água. Segundo TUNDISI *et al.* (1994) a estrutura térmica, assim como os padrões de circulação e transporte de material são resultantes de fenômenos físicos como temperatura, vento, precipitação, interação com os influxos de água, tipo de tomada d'água e operação da barragem.

O perfil térmico foi realizado no local da coleta com auxílio de um termômetro digital, com leitura em cada um dos quatro perfis, referente à norma *Standard Methods 2550*.

O pH é a medida da concentração do íon H^+ nas águas e indica as condições de acidez, neutralidade ou alcalinidade das águas.

As condições de pH têm forte influência no comportamento das comunidades vegetais e animais. As alterações no valor do pH pelas comunidades acontecem quando os organismos assimilam CO_2 elevando o pH do meio, este, por sua vez, atua nos processos de permeabilidade da membrana celular, interferindo no transporte iônico intra e extra-celular e entre os organismos e o meio (Esteves, 1998). A determinação do pH foi feita no local da coleta, com auxílio de pHmetro portátil PHTEK (Figura 20). O método utilizado para a determinação deste parâmetro foi *NBR 9896/1993*.



Figura 19 - Determinação do pH da água.

A condutividade elétrica é a capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica. Este parâmetro está relacionado com a presença de íons dissolvidos na água, que são partículas carregadas eletricamente. Quanto maior for a quantidade de íons dissolvidos, maior será a condutividade elétrica na água. As medidas de condutividade elétrica foram feitas *in situ*, com auxílio de um condutivímetro portátil Hach (Figura 21), referente à norma *Standard Methods 2510*.



Figura 20 - Determinação da condutividade elétrica da água.

5.6 TRABALHOS PÓS-CAMPO

5.6.1 Íon amônio

Princípio do método

No laboratório foi realizado a análise do íon amônio que é formado pela decomposição da matéria orgânica, durante o processo de amonificação. O espectrofotômetro utilizado nas leituras foi um Micronal B 582 (Figura 21). E o procedimento experimental seguiu a norma *Standard Methods* 21st Edition, 4500-NH₃ F, Phenate Method.

A Tabela 05 mostra todos os materiais e reagentes utilizados na análise de íon amônio.

Tabela 5 - Materiais e reagentes utilizados na análise de íon amônio.

Materiais	Reagentes
Tubos de ensaio 15 MI	Solução de hipoclorito de sódio (NaClO) 5%
Pipeta volumétrica 10 mL	Solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 N
Micropipeta 1 MI	Fenol P.A (C ₆ H ₅ OH)
Papel rolopack	Nitroprussiato de sódio (Na [Fe (CN) ₅ NO].2H ₂ O)
Conjunto de Filtração a vácuo	Solução de cloreto de amônio (NH ₄ Cl).
Espectrofotômetro	



Figura 21 - Espectrofotômetro Micronal B 582.

5.6.2 Sólidos totais em suspensão (STS)

Princípio do método

A amostra homogeneizada é filtrada através de um filtro de microfibras de vidro padrão, previamente tarado, e o resíduo retido no filtro a seco a uma temperatura entre 103 a 105 °C. O aumento no peso do filtro representa os sólidos totais em suspensão. Se o material suspenso entupir o filtro e prolongar a filtração, pode ser necessário aumentar o diâmetro do filtro ou diminuir o volume da amostra, referente à norma: *Standard Methods 2540-D*.

5.6.3 Dureza

Princípio do método

O ácido etilendiaminotetracético (EDTA) e seus sais de sódio formam um complexo solúvel quando adicionados a uma solução contendo certos cátions metálicos. Se uma pequena quantidade de um corante, como negro de ericromo T é adicionado a uma solução aquosa contendo íons cálcio e magnésio em pH em torno de 10, a solução torna-se vermelho-vinho. Se o EDTA é adicionado como titulante, os íons cálcio e magnésio serão complexados e quando todos eles tiverem sido complexados a solução torna-se azul, marcando o ponto final da titulação, referente a norma: *Standard Methods 2340 C*.

5.6.4 Oxigênio dissolvido

Princípio do método

O teor de oxigênio dissolvido foi determinado pelo método iodométrico de Winckler modificado pela azida de sódio, referente às normas: Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT/ NBR 10559/Dez/1988 e *Standard Methods 4500-O C*.

A amostra bruta é tratada com Sulfato Manganoso e Iodeto de Potássio, em meio fortemente alcalino de Hidróxido de Sódio. O Sulfato Manganoso reage com Hidróxido de Sódio, produzindo um precipitado de Hidróxido Manganoso. O Oxigênio dissolvido

oxida uma quantidade de Manganês a hidróxidos básicos de coloração marrom. Quando a solução é acidificada, o precipitado se dissolve formando Sulfato Mangânico, que reage com Iodeto de Potássio, liberando Iodo que é titulado com a solução de Tiossulfato de Sódio.

5.7 PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

As amostras dos elementos químicos e ânions foram armazenadas em frascos de 50 mL do tipo eppendorf. Os frascos de eppendorf utilizados para coleta foram inicialmente lavados com água ultra pura para remoção de sujeiras e plásticos remanescente, e em seguida submetidos à solução de lavagem de ácido nítrico 10%, por um período de 24h.

A preservação das amostras de água foi realizada segundo a norma 1060B proposta no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” uma publicação da Associação Americana para Saúde Pública (APHA) em associação com a Associação Americana para Trabalhos com Água (WEF) (<http://www.standardmethods.org/>). Segundo a referida norma, o recipiente de polietileno é o recomendado para coleta dos elementos químicos e ânions, utilizando para a preservação dos elementos químicos 2 ml HNO₃L ácido supra-puro com tempo máximo de estocagem de seis meses e para os ânions a preservação realizado foi a refrigeração, sendo que a análise química destes parâmetros foi realizada em no máximo 48h.

5.8 INSTRUMENTAÇÃO

Todas as análises de elementos químicos foram realizadas no Laboratório de Toxicologia e Essencialidade de Metais da Universidade de São Paulo – USP de Ribeirão Preto – SP, utilizando-se um ICP-MS modelo Elan DRC II (Perkin-Elmer, Norwalk, CT) operando com argônio de alta pureza (99,999%) (Figura 23). Foi utilizado um nebulizador concêntrico do tipo Meinhard (Spectron/Glass Expansion, Ventura, CA, USA) e câmara de nebulização do tipo ciclônica. A radiofrequência (RF) selecionada foi de 1100 watts no modo pulso e as lentes operando entre 6 e 9V Os

dados das amostras foram obtidos usando 20 varreduras de leitura (sweeps/reading) e 3 replicatas. A vazão de gás no nebulizador foi de $(0,7 \text{ L min}^{-1})$. A bomba peristáltica operou em uma rotação de 20rpm. Os resultados foram obtidos em contagens por segundo (cps).



Figura 22 - Espectrometria de massa com fonte de plasma de Argônio induzido (ICP-MS) modelo Elan DRC II (Perkin-Elmer, Norwalk, CT).

Na Tabela 06 estão algumas características da instrumentação utilizada. Embora o equipamento utilizado disponha de cela de reação dinâmica (DRCICP-MS) para remover interferências poliatômicas, foi utilizado o equipamento no modo padrão com a válvula de DRC vetada.

Tabela 6 - Instrumentação e parâmetros utilizados.

Instrumentação	Elan DRC II (Perkin Elmer SCIEX)
Nebulizador	Meinhard
Câmara de nebulização	Ciclônica
Tocha, bico injetor	Quartzo
Lentes Iônicas	6 - 9 V
Potência de Radio Freqüência (RF)	1100 W
Vazão do gás de Nebulização	0,7 L min ⁻¹
Vazão do gás do Plasma	15 L min ⁻¹
Vazão do gás auxiliar	1,2 L min ⁻¹
Isótopos	Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, U, V, Zn
Cone de amostragem	1,1 mm de diâmetro do orifício.
Skimmer	0,9 mm de diâmetro do orifício.
Tempo de integração	2000 ms
Replicatas	3
Vazão	1,0 mL min ⁻¹

5.9 CALIBRAÇÃO DO ICP-MS

A análise quantitativa utilizando a técnica de ICP-MS requer a construção de curvas de calibração diárias, que serão referência para converter as intensidades registradas nas análises das soluções-problema em concentrações dos respectivos elementos. A calibração do ICP-MS exige soluções de referência e curvas para todos os elementos determinados no trabalho. As curvas analíticas de calibração foram construídas com cinco pontos ($0,1 \mu\text{g L}^{-1}$; $1 \mu\text{g L}^{-1}$; $5 \mu\text{g L}^{-1}$; $10 \mu\text{g L}^{-1}$; $20 \mu\text{g L}^{-1}$ e $50 \mu\text{g L}^{-1}$), e preparadas por diferentes diluições da solução estoque. A água utilizada em todas as determinações foi ultrapura com condutividade mínima de $0,057 \mu\text{S/cm}$.

O limite de detecção (LD) definido, pela *International Union of Pure Applied Chemistry (IUPAC)*, como a menor concentração elementar mensurável com confiabilidade em um determinado método (IUPAC, 2008), o limite de detecção é a menor concentração que o analito pode ser detectado e distinguido do zero, mas não necessariamente o limite quantificado. O limite de detecção é calculado como três vezes o desvio padrão de 10 replicatas do branco dividido pelo coeficiente angular da curva de calibração do referido analito. O Limite de quantificação é a menor concentração do analito que pode ser quantificada, e é calculado com dez vezes o desvio padrão de 10 replicatas do branco dividido pelo coeficiente angular da curva de calibração (González, 2007). Os Coeficientes de correlação, limite de detecção (L.D.) e de quantificação dos analitos, estão apresentados na Tabela 07.

Tabela 7 - Coeficiente de correlação, limite de detecção (L.D.) e de quantificação dos analitos.

Analito	Coeficiente Linear	Limite de Detecção (µg/L)	Limite de Quantificação (µg/L)
Al	0,9998	1,399	4,253
As	0,9999	0,026	0,078
Ba	0,9999	0,020	0,061
Be	0,9999	0,061	0,185
Ca	0,9997	2,188	6,651
Cd	0,9999	0,025	0,076
Co	0,9999	0,037	0,112
Cr	0,9999	0,044	0,133
Cu	0,9999	0,004	0,014
Fe	0,9998	1,900	5,775
Ga	0,9999	0,016	0,047
Hg	0,9999	0,002	0,023
K	0,9997	2,985	9,074
Li	0,9999	0,066	0,199
Mg	0,9998	1,055	3,208
Mn	0,9999	0,018	0,056
Na	0,9996	4,172	12,681
Ni	0,9999	0,047	0,143
Pb	0,9999	0,035	0,106
Rb	0,9999	0,002	0,007
Se	0,9999	0,169	0,514
Sr	0,9999	0,020	0,060
Tl	0,9999	0,025	0,075
U	0,9999	0,034	0,104
V	0,9999	0,039	0,120
Zn	0,9999	0,472	1,436

A eficiência do método analítico foi verificada através da leitura do padrão de referência de água de rio SLRS-4 (River Water reference material for trace metal, National Research Council Canadá), e esta apresentada na Tabela 08.

Tabela 8 - Análise do material de referência de água de rio SLRS-4, valores expressos como média \pm SD, n = 3).

Padrão de Referência SLRS-4		
Analito	Valor encontrado ($\mu\text{g/L}$)	Valor real ($\mu\text{g/L}$)
Al	55,191 \pm 0,15	54 \pm 4
As	0,67 \pm 0,02	0,68 \pm 0,06
Ba	12,950 \pm 0,02	12,2 \pm 0,6
Be	0,008 \pm 0,01	0,007 \pm 0,002
Ca	5714,537 \pm 3,70	6200 \pm 200
Cd	0,013 \pm 0,01	0,012 \pm 0,002
Co	0,032 \pm 0,01	0,033 \pm 0,006
Cr	0,319 \pm 0,03	0,33 \pm 0,02
Cu	1,774 \pm 0,04	1,81 \pm 0,08
Fe	109,531 \pm 0,70	103 \pm 5
K	603,000 \pm 3,76	680 \pm 20
Mg	1585,035 \pm 4,72	1600 \pm 100
Mn	3,444 \pm 0,01	3,37 \pm 0,18
Na	2268,77 \pm 8,77	2400 \pm 200
Ni	0,712 \pm 0,01	0,67 \pm 0,08
Pb	0,078 \pm 0,04	0,086 \pm 0,007
Sr	28,603 \pm 0,06	0,050 \pm 3,2
U	0,051 \pm 0,01	0,050 \pm 0,003
V	0,395 \pm 0,01	0,32 \pm 0,03
Zn	1,114 \pm 0,03	0,93 \pm 0,1

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas tabelas 09 e 10 estão apresentados os resultados dos parâmetros químicos e físico-químicos das amostras superficiais de água coletadas no reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes no período de estiagem e no período chuvoso respectivamente.

Tabela 9 - Resumo estatístico dos resultados químicos ($\mu\text{g.L}^{-1}$) e físico-químicos da água do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes – Amapá (período de estiagem).

Parâmetro	N	Valores			Desvio padrão
		Média	Máximo	Mínimo	
T °C	74	29,57	30,91	27,60	0,56
Cond. ($\mu\text{s/cm}$)	74	33,20	56,17	18,50	12,92
pH	74	6,50	7,13	4,48	0,41
STS (mg/L)	74	2,32	8,80	0,00	2,13
HCO_3^-	74	10,8	16,1	5,40	2,31
NH_4^+	74	21,20	308,11	0,00	41,62
DUREZA (mg/L)	74	5,61	8,44	3,64	0,93
OD (mg/L)	74	6,16	7,60	1,23	1,00
Al	74	487,44	1364,62	163,09	191,38
As	74	1,22	2,75	0,80	0,42
Ba	74	16,50	48,91	12,07	5,74
Be	74	0,03	0,05	0,01	0,01
Ca	74	604,12	789,47	515,99	53,49
Cd	74	0,02	0,08	0,01	0,01
Co	74	0,27	1,24	0,10	0,14
Cr	74	1,21	1,97	0,82	0,22
Cu	74	1,54	5,17	0,12	1,10
Fe	74	458,78	2430,21	297,42	273,87
Hg	74	0,41	4,69	0,01	0,61
K	74	798,05	1099,11	638,83	80,66
Li	74	0,77	0,90	0,59	0,06
Mg	74	625,40	843,29	470,00	123,34
Mn	74	123,42	1257,81	34,86	160,93
Na	74	1903,71	2313,93	1583,35	137,49
Ni	74	0,67	1,08	0,44	0,12
Pb	74	3,86	14,84	0,86	2,68
Se	74	0,17	0,45	0,05	0,07
Sr	74	11,31	15,93	8,19	1,13
V	74	1,02	2,04	0,76	0,18
Zn	74	16,27	76,69	1,43	14,45

Tabela 10 - Resumo estatístico dos resultados químicos ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) e físico-químicos da água do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes – Amapá (período chuvoso).

Parâmetro	N	Valores			Desvio padrão
		Média	Máximo	Mínimo	
T °C	83	27,21	29,50	26,00	0,81
Cond. ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	83	18,56	22,70	15,50	2,03
Ph	83	6,52	7,50	5,99	0,22
STS (mg/L)	83	3,86	18,60	0,00	4,23
HCO_3^-	83	9,00	17,50	6,50	2,19
NH_4^+	83	8,85	128,63	0,00	16,72
DUREZA (mg/L)	83	6,09	8,54	4,71	0,85
OD (mg/L)	83	5,52	7,82	1,39	1,04
Al	83	430,48	3399,16	144,32	372,00
As	83	1,00	7,20	0,64	0,75
Ba	83	22,55	135,16	14,52	14,82
Be	83	0,05	0,45	0,02	0,05
Ca	83	527,74	1078,00	404,96	101,72
Cd	83	0,03	0,87	0,01	0,10
Co	83	0,51	8,69	0,13	1,03
Cr	83	1,05	5,16	0,61	0,52
Cu	83	1,54	20,34	0,22	3,08
Fe	83	511,57	4455,73	107,22	533,49
Hg	83	0,28	4,62	0,00	0,63
K	83	700,97	1037,05	506,87	113,54
Li	83	0,67	1,83	0,39	0,16
Mg	83	485,67	966,20	385,60	83,64
Mn	83	84,06	769,00	36,43	106,44
Na	83	1899,18	2780,37	1574,16	171,36
Ni	83	0,85	5,12	0,36	0,71
Pb	83	5,25	49,69	0,28	9,88
Se	83	0,16	0,36	0,06	0,05
Sr	83	10,42	18,06	8,54	1,52
V	83	1,21	19,21	0,32	2,05
Zn	83	8,79	72,05	0,24	11,78

6.1 CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA

Os diagramas de Piper trilinear permite detectar diferenças ou semelhanças entre vários tipos de águas, misturas de águas e a origem comum ou não dos íons analisados.

Esses diagramas de Piper são adequados para salientar a influência dos macroconstituintes iônicos das águas naturais e a mistura de águas. Esses diagramas estão representados nas figuras 24, 25, 26 e 27 mostram a evolução da composição química geral das águas da região, durante o período sazonal da amostragem, indicando águas quase que predominantemente bicarbonatadas sódicas nos períodos analisados independentemente da sazonalidade das chuvas na região.

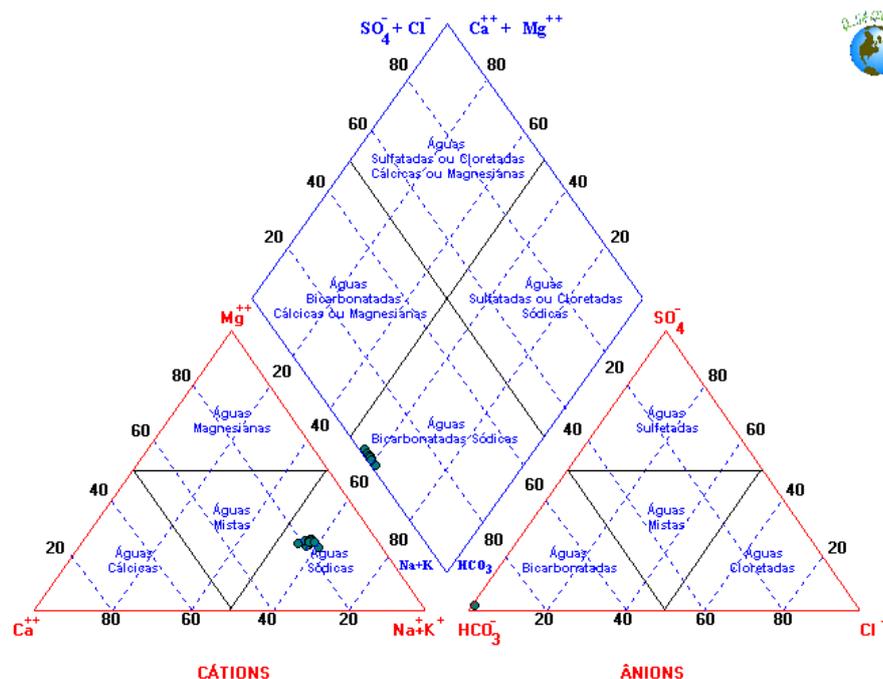


Figura 23 - Diagrama de Piper das amostras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (primeira campanha – período seco).

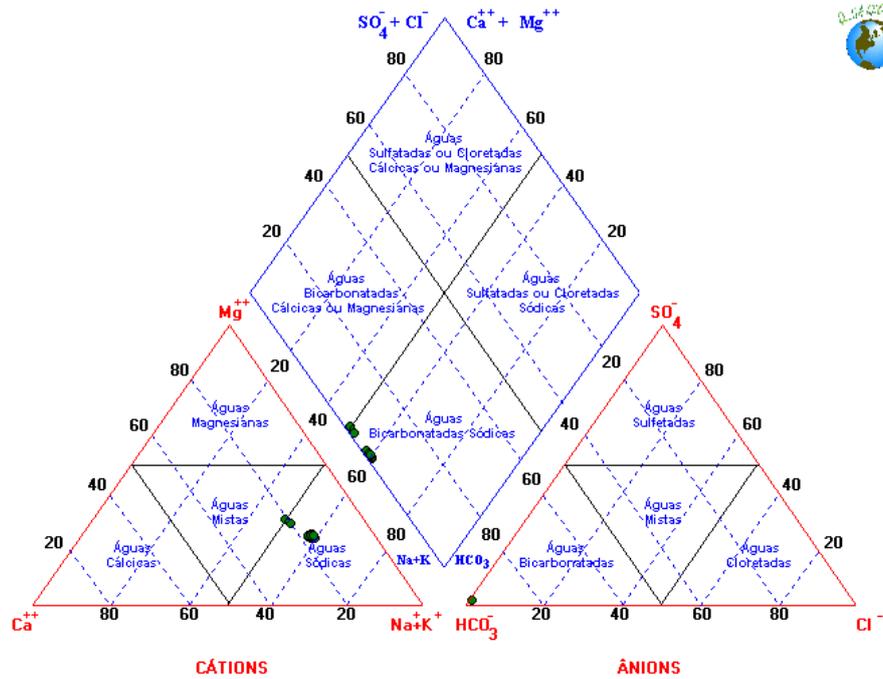


Figura 24 - Diagrama de Piper das amostras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (segunda campanha – período chuvoso).

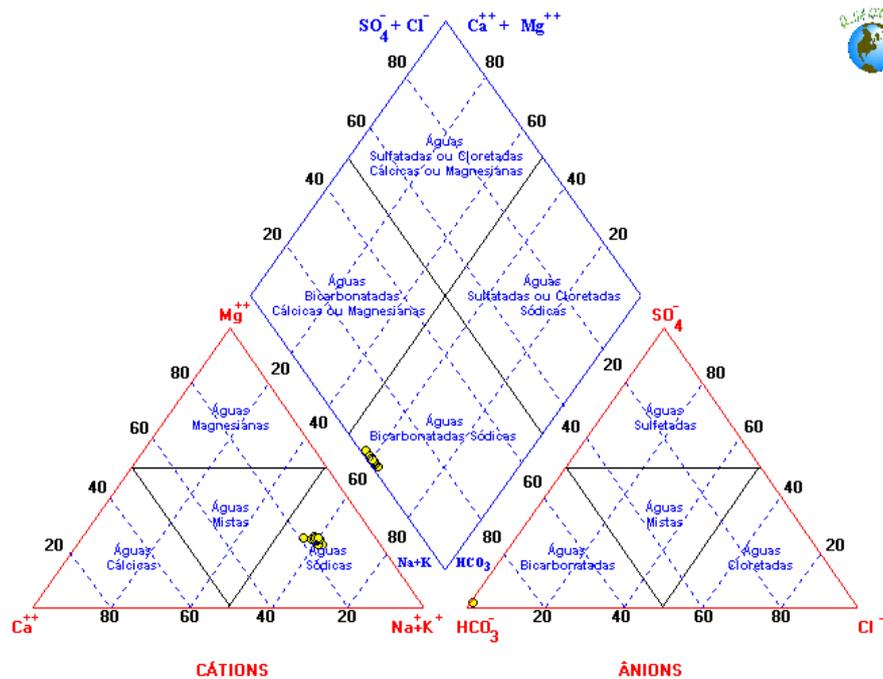


Figura 25 - Diagrama de Piper das amostras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (terceira campanha – período chuvoso).

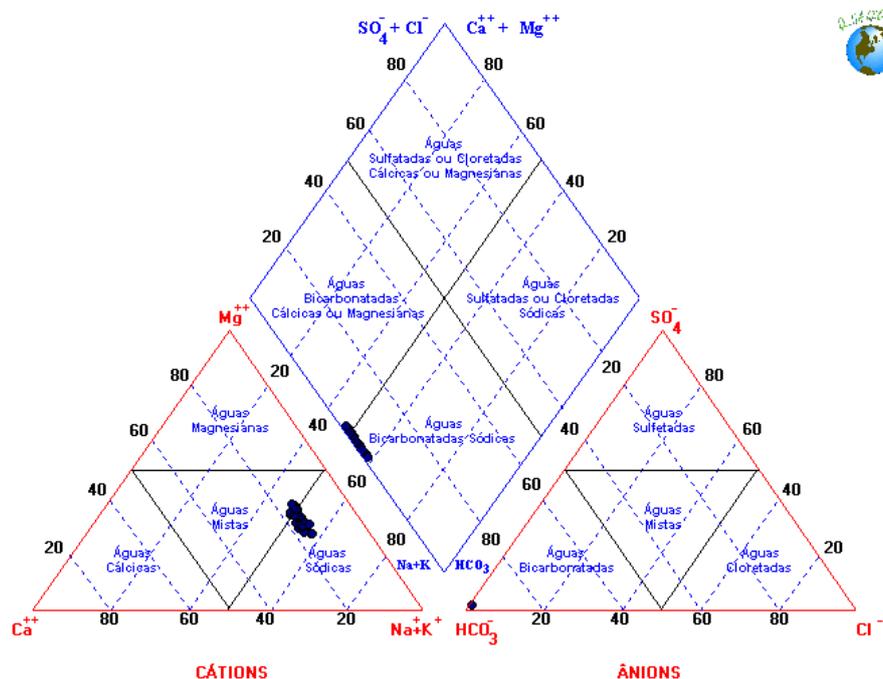


Figura 26 - Diagrama de Piper das amostras de água da área do reservatório hidrelétrico de Coaracy Nunes (quarta campanha – período seco).

6.2 VARIAÇÕES HIDROQUÍMICAS SUPERFICIAIS

6.2.1 Variações superficiais dos parâmetros físico-químicos e físicos

A medição do pH é um dos mais importantes e freqüentemente utilizados testes na química da água. O pH é um fator importante na determinação das propriedades químicas e biológicas da água. Ele afeta a formas químicas e o impacto ambiental de muitas substâncias químicas na água. O valor do pH é um indicador do estado químico no qual os compostos serão encontrado no meio ambiente. Concentrações de dióxido de carbono em água é um dos mais comuns fatores de mudança de pH, quando dissolvido na água o pH é reduzido, quando é liberado da água, o pH aumenta.

Nos períodos amostrais, a variação deste parâmetro no período de estiagem foi de 5,98 a 7,03 e média de 6,57, refletindo o caráter ligeiramente ácido na água superficial (Tabela 09). A variação deste parâmetro no período de chuvoso foi de 6,2 a

7,1 e média de 6,55, refletindo o caráter ligeiramente ácido na água superficial (Tabela 10).

A condutividade elétrica ou condutância específica representa numericamente a capacidade da água em transmitir a corrente elétrica. Depende diretamente da concentração iônica da solução e da temperatura, fornecendo uma indicação rápida da salinidade de uma solução. No estado natural, a água apresenta condutividade elétrica diretamente proporcional à quantidade de íons dissolvidos (STD).

Nos períodos amostrais, a variação da condutividade no período de estiagem foi de 18,5 a 46,6 e média de 32,4, caracterizando a água superficial do reservatório com baixos resultados de condutividade elétrica (Tabela 09). A variação deste parâmetro no período de chuvoso foi de 15,5 a 22,7 e média de 18,6, mostrando que no período chuvoso temos uma diminuição da condutividade elétrica na água superficial do reservatório (Tabela 10).

A quantidade de oxigênio dissolvido influencia todos os processos físico-químicos e biológicos que ocorrem na água. A medida de sua concentração é usada para indicar o grau de poluição por matéria orgânica e o nível de auto-purificação da água (Esteves, 1998).

Os teores médios de Oxigênio Dissolvido (OD) situaram-se entre 5,52 e 5,61 mg/l; os menores valores (mínimo de 1,23 mg/l) foram obtidos dentro do reservatório e praticamente não se observa a típica distribuição vertical do oxigênio (Figura 33), característica de lagos estratificados, onde o acúmulo de material em decomposição é alto no fundo e o consumo de oxigênio elevado (Tundisi & Takako, 2008).

O principal interesse do estudo da temperatura é seu papel na estruturação térmica dos corpos d'água.

Segundo Tundisi *et al.* (1996) a estrutura térmica, assim como os padrões de circulação e transporte de material, são resultantes de fenômenos físicos como temperatura, vento, precipitação, interação com os influxos de água, tipo de tomada d'água e operação da barragem. Os valores médios de temperatura em (°C) situaram-se entre 27,21°C e 29,57 °C.

A amônia é formada pela decomposição da matéria orgânica, durante o processo de amonificação. Nesse processo, a amônia resulta tanto da decomposição aeróbica quanto anaeróbica da parte nitrogenada da matéria orgânica. Essa transformação se dá através da ação de organismos heterotróficos e ocorre principalmente no sedimento (Esteves, 1998).

A principal forma de nitrogênio analisada foi o íon amônio (NH_4^+) ou amônia, importante para os processos de produção primária (Esteves, 1988). A variação média de NH_4^+ situou-se entre 8,85 e 21,20 $\mu\text{g/L}$, cujo valor mais elevado (encontrado durante a estiagem), atingiu 308,11 $\mu\text{g/L}$. Nos raros perfis de distribuição das concentrações do amônio (estiagem), o aumento das concentrações do íon é acompanhado por ligeira diminuição do pH e pelo decréscimo nas concentrações de oxigênio dissolvido (Figuras 9 e 10). As menores concentrações de NH_4^+ , observadas em superfície, correspondem ao consumo do íon, fixado nos processos de fotossíntese, sob luz solar intensa, que confirmam os valores mais elevados do pH e a produção de oxigênio dissolvido.

6.2.2 Análise de correlação entre os parâmetros físico-químicos período seco

A análise de correlação foi realizada nos pontos 09, onde inicia-se a formação do reservatório, e no ponto (04) no ponto mais profundo reservatório, localizado próximo a barragem.

Com relação ao Sítio Montante 04, verifica-se na Tabela 11 a existência de correlação entre os parâmetros profundidade (m) e condutividade ($\mu\text{s/cm}$) com nível descritivo igual a 0,030, não havendo, portanto, correlação entre os demais parâmetros em nível de significância de $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

Tabela 11 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09 – (MCN 04).

(continua)

	Profundidade (m)*	T (°C)	Cond. ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	STS (mg/L)	NH ₃ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Dureza (mgCaCO ₃ /L)
T (°C)	-0.637 0.363						
Cond. ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	0.970 0.030	-0.567 0.433					
pH	-0.394 0.606	-0.436 0.564	-0.387 0.613				

(conclusão)

	Profundidade (m)*	T (°C)	Cond. ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	STS (mg/L)	NH ₃ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Dureza (mgCaCO ₃ /L)
STS (mg/L)	0.387 0.613	-0.748 0.252	0.486 0.514	0.576 0.424			
NH ₃ ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.046 0.954	-0.793 0.207	-0.050 0.950	0.834 0.166	0.578 0.422		
Dureza (mgCaCO ₃ /L)	0.762 0.238	-0.554 0.446	0.582 0.418	0.367 0.633	-0.066 0.934	0.207 0.793	
OD (mg O ₂ /L)	-0.227 0.773	-0.408 0.592	-0.422 0.578	0.577 0.423	-0.052 0.948	0.784 0.216	0.314 0.686

(*) Profundidades: 0, 3, 10, 20 m; valores em negrito são significantes considerando $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

No Sítio Montante 09, verifica-se na Tabela 12 a existência de correlação entre os parâmetros entre oxigênio dissolvido (mg O₂/L) e STS (mg/L) com nível descritivo igual a 0,007, não havendo, portanto, correlação entre os demais parâmetros em nível de significância de $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

Tabela 12 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09.

	Profundidade (m)*	T (°C)	Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	STS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH3 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
T (°C)	0.401 0.737					
Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	-0.619 0.575	0.471 0.688				
pH	0.545 0.633	-0.549 0.630	-0.996 0.058			
STS (mg/L)	0.000 1.000	-0.916 0.263	-0.786 0.425	0.839 0.367		
NH3($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.784 0.427	0.884 0.310	0.004 0.998	0.094 0.940	-0.621 0.573	
OD ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	0.011 0.993	-0.911 0.270	-0.793 0.417	0.845 0.360	1.000 0.007	-0.613 0.580

(*) Profundidades: 0, 3, 6 m; valores em negrito são significantes considerando $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

6.2.3 Análise de correlação entre os parâmetros físico-químicos período chuvoso

Com relação ao Sítio Montante 04, verifica-se na Tabela 13 a existência de correlação entre os parâmetros condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) e STS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) com nível descritivo igual a 0,039, não havendo, portanto, correlação entre os demais parâmetros em nível de significância de $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

Tabela 13 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 04 – (MCN 04).

	Profundidade (m)*	Temperatura °C	Condutividade (µs/cm)	pH	STS (mg.L ⁻¹)	Dureza (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)
Temperatura °C	-0,858 0,142					
Condutividade (µs/cm)	-0,810 0,190	0,447 0,553				
pH	0,000 1,000	-0,408 0,592	0,183 0,817			
STS (mg/L)	-0,912 0,088	0,667 0,333	0,961 0,039	-0,030 0,970		
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	0,472 0,528	-0,707 0,293	-0,316 0,684	0,866 0,134	-0,524 0,476	
OD (mg O ₂ /L)	0,472 0,528	0,000 1,000	-0,632 0,368	-0,866 0,134	-0,472 0,528	-0,500 0,500

(*) Profundidades: 0, 3, 7, 14 m; valores em negrito são significantes considerando $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

Com relação ao Sítio Montante 09, verifica-se na Tabela 14 a existência de correlação entre os parâmetros condutividade (µs/cm) com íon amônio (µg.L⁻¹) com nível descritivo igual a 0,030, não havendo, portanto, correlação entre os demais parâmetros em nível de significância de $2,5 < \alpha / 2 < 5\%$.

Tabela 14 - Matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos da água no sítio Montante 09 – (MCN 09)

	Profundidade (m)*	Temperatura °C	Condutividade (µs/cm)	pH	íon amônio (µg.L ⁻¹)	Dureza (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)
Temperatura °C	-0,239 0,761					
Condutividade (µs/cm)	-0,209 0,791	-0,729 0,271				
pH	-0,845 0,155	0,000 1,000	0,619 0,381			
íon amônio (µg/L)	-0,202 0,798	-0,843 0,157	0,970 0,030	0,530 0,470		
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	0,717 0,283	0,500 0,500	-0,656 0,344	-0,707 0,293	-0,750 0,250	
OD (mg O ₂ /L)	0,956 0,123	-0,500 0,500	0,073 0,927	-0,707 0,293	0,093 0,907	0,500 0,500

(*) Profundidades: 0, 3, 6 m; valores em negrito são significantes considerando $2,5 < \alpha/2 < 5\%$.

6.3 VARIAÇÕES SUPERFICIAIS DOS PRINCIPAIS CÁTIONS

Nas Figuras 25 a 32 estão apresentados os mapas hidroquímicos, para o alumínio, cálcio, chumbo, ferro, magnésio, manganês, sódio, e potássio, no período seco e período chuvoso, das amostras superficiais em 13 pontos do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes.

6.3.1 Cálcio

Os teores médios de cálcio situaram-se entre 527,74 e 604,12 µg.L⁻¹, apresento valor mínimo de 404,96 µg.L⁻¹ e valor máximo de 1078,00 µg.L⁻¹. O mapa hidroquímico do parâmetro cálcio esta apresentado na Figura 28, o período seco mostra a recarga deste elemento através do ponto 9, entrada do reservatório, as maiores concentrações estão localizados em torno do ponto 5. O período chuvoso apresenta uma recarga bem diversificada devido o aumento do índice pluviométrico, fazendo com que a água da chuva contribua para recarga deste elemento. No ponto 3, nos dois períodos amostrais, as linhas de isoteor estão apresentadas de forma circular, mostrando uma contribuição homogênea deste ponto. A diferença de concentração deste elemento no ponto 3 nos dois períodos amostrais pode está relacionado com o fato de que no período chuvoso as

comportas da usina hidrelétrica são abertas, devido a elevação nível do reservatório, e o ponto 3 está localizado a frente destas comportas, fazendo com que o fluxo de movimentação da água nas proximidades desse ponto seja intensa, causando possíveis misturas de água de fundo com a da superfície.

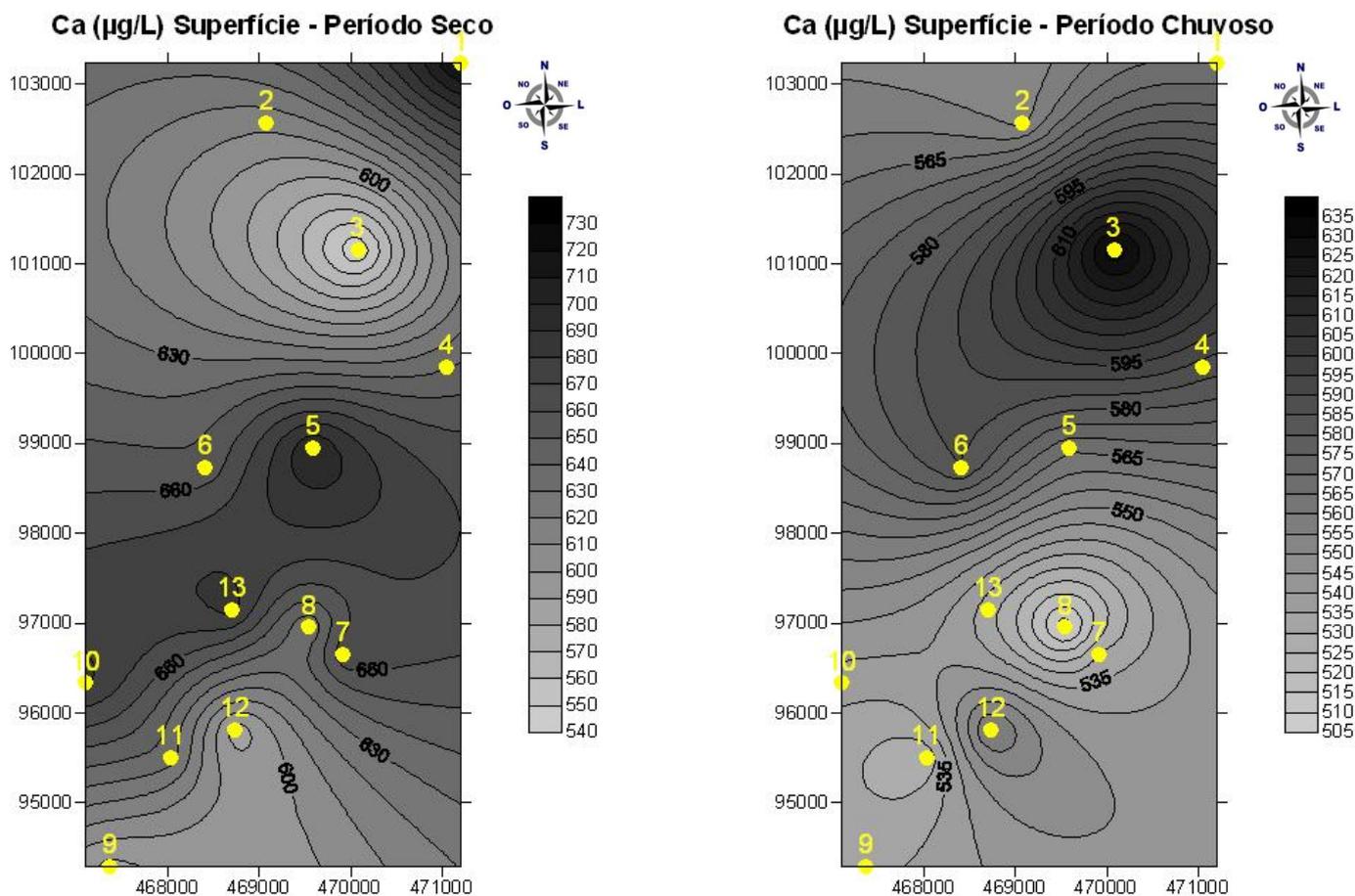


Figura 27 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do cálcio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.3.2 Potássio

Os teores médios de potássio situaram-se entre $700,97$ e $798,05 \mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de $506,87 \mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de $1099,11 \mu\text{g.L}^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro potássio apresentado na Figura 29, mostra a recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio. No período chuvoso, temos uma contribuição de recarga de outras áreas. Os pontos 3, 8 e 12, as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo.

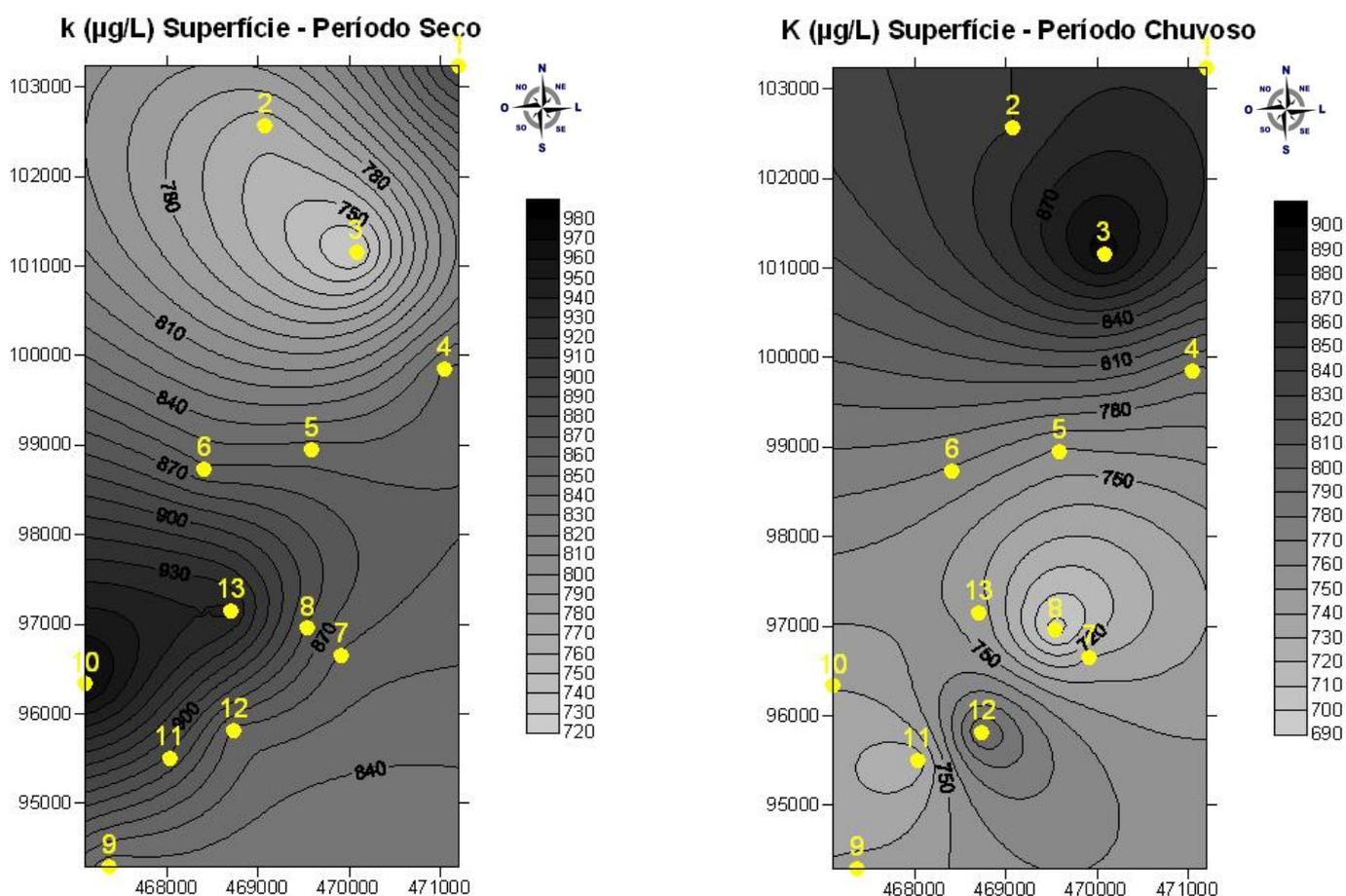


Figura 28 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do potássio ($\mu\text{g/L}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.3.3 Sódio

Os teores médios de sódio situaram-se entre 1899,18 e 1903,71 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 1574,16 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 2780,37 $\mu\text{g.L}^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro sódio apresentado na Figura 30, mostra a recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio, e mostra nos pontos 8 e 12 as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo. No período chuvoso, temos uma contribuição de recarga de outras áreas.

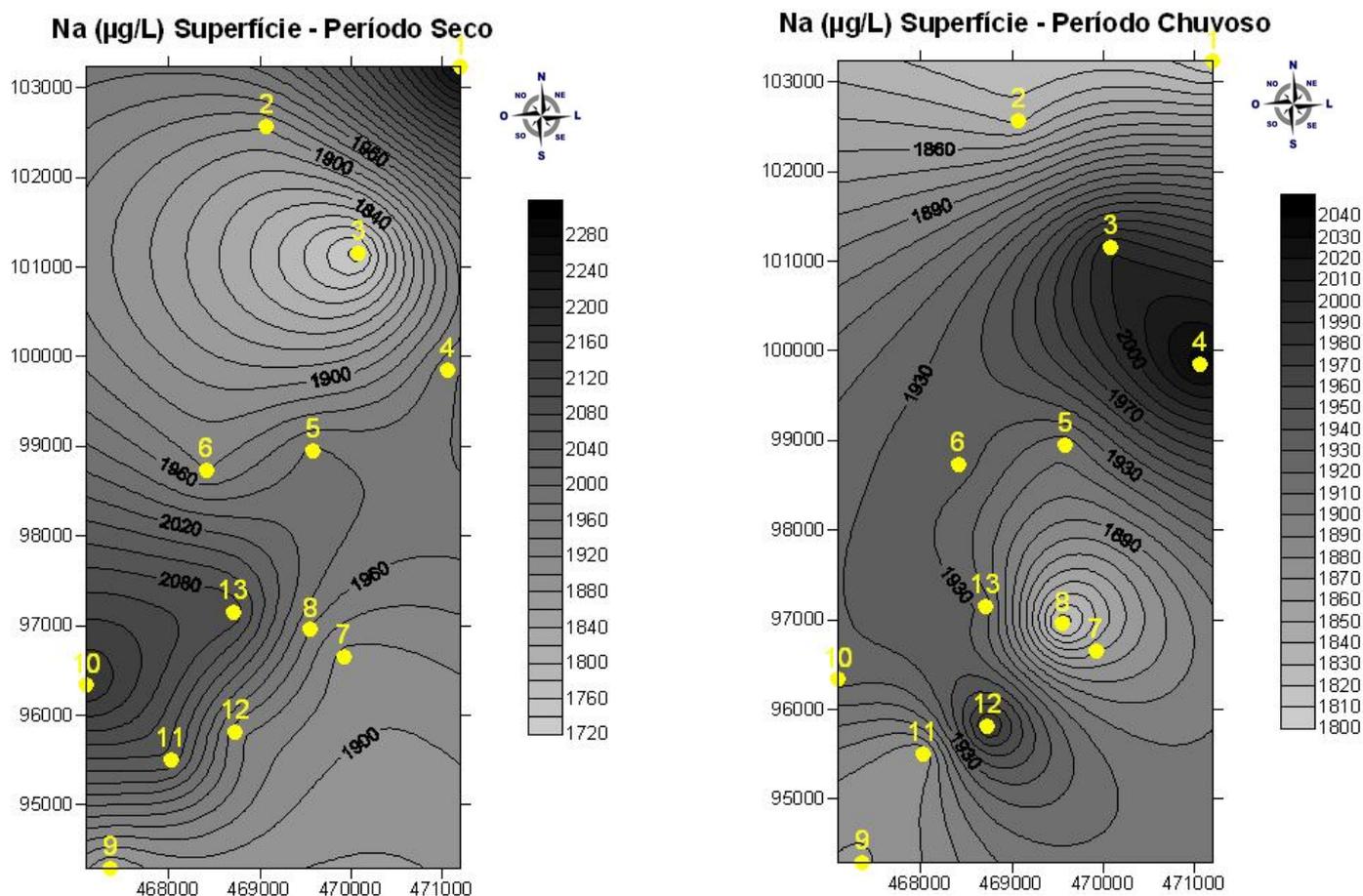


Figura 29 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do sódio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.3.4 Magnésio

Os teores médios de magnésio situaram-se entre 485,67 e 625,40 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 385,60 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 966,20 $\mu\text{g.L}^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro magnésio apresentado na Figura 31, mostra a recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio. No período chuvoso, temos uma contribuição de recarga de outras áreas. No período chuvoso os pontos 3, 8 e 12 as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo.

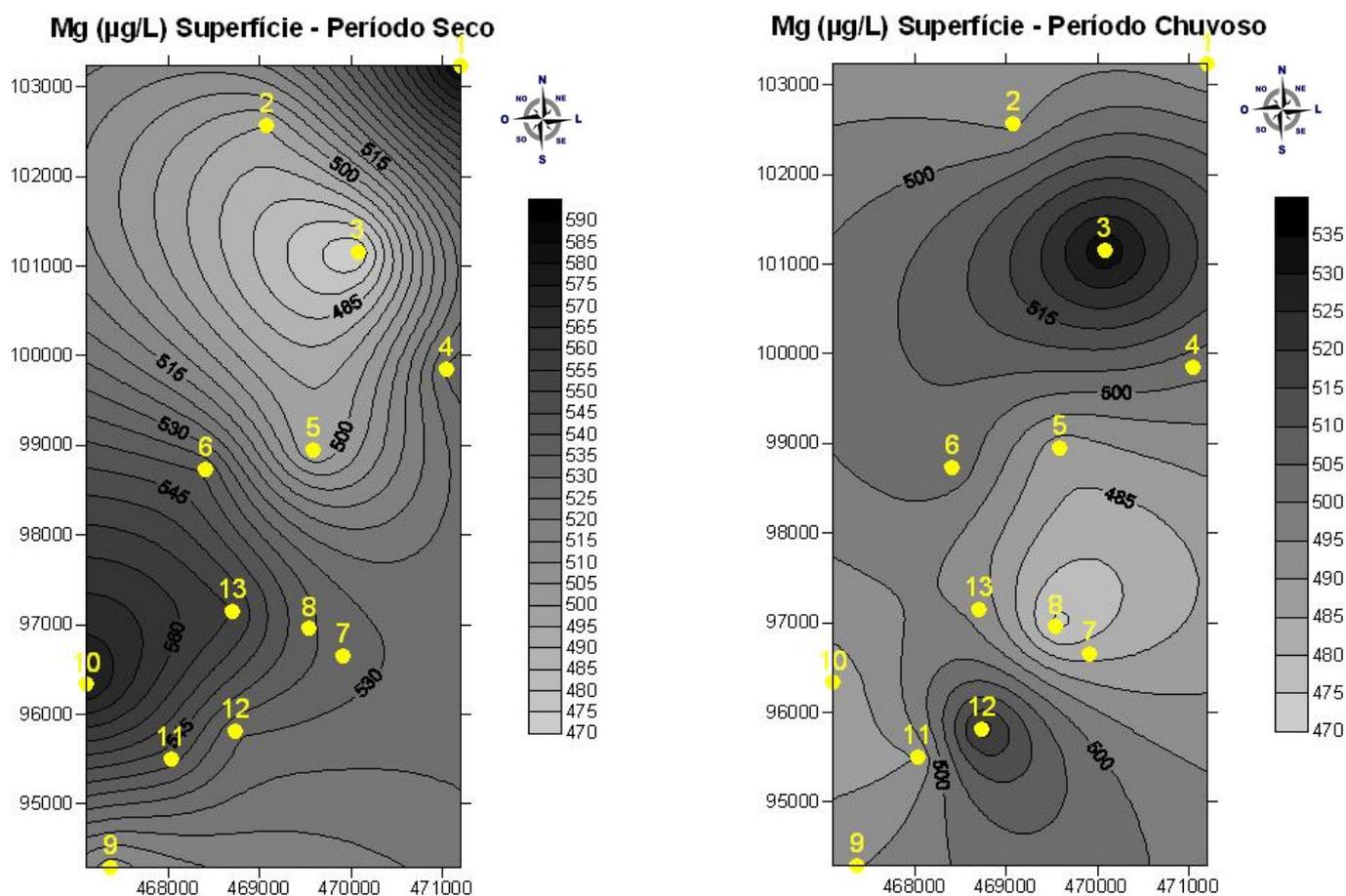


Figura 30 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do magnésio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.4 VARIAÇÕES SUPERFICIAIS DE ELEMENTOS TRAÇO

6.4.1 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na litosfera da Terra (depois do oxigênio e silício) e seus compostos são frequentemente encontrados em águas naturais. O alumínio é naturalmente mobilizada no ambiente através do intemperismo das rochas e mineral, argilas especialmente bauxita. A maioria dos compostos de alumínio apresentam baixa solubilidade em pH entre 6-9. Por isso, formas dissolvidas raramente ocorrem em águas naturais em concentrações superiores a cerca de 0,01 mg.L⁻¹. Concentrações superiores quando encontrado em águas naturais normalmente indicam a presença de alumínio em forma sólida ou na forma de colóide. Uma elevada concentração de Al³⁺, quando excedem as concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺, É uma característica comum das águas ácidas (pH<5), incluindo a drenagem de minas e águas atingidas pela chuva ácida (Weiner, 2000).

O aumento do seu teor nas águas é decorrente do lançamento de efluentes industriais, esgotos domésticos, resíduos industriais, de mineração e de produtos utilizados na agricultura, bem como através de fontes minerais.

Os teores médios de alumínio situaram-se entre 430,48 e 487,44 µg.L⁻¹, apresento valor mínimo de 144,32 µg.L⁻¹ e valor máximo de 3399,16 µg.L⁻¹. O mapa hidroquímico do parâmetro alumínio apresentado na Figura 32, mostra concentrações elevadas de alumínio na área do reservatório, tanto no período seco como no período chuvoso, sendo que o período seco apresenta concentrações mais elevadas, principalmente na entrada da área do reservatório (ponto 9), mostrando que o fluxo de recarga do alumínio no reservatório é proveniente de outras áreas por onde as águas do rio Araguari transitou anteriormente. O período chuvoso apresenta uma característica diferenciada, pois nesse período é evidenciado que as linhas de isoteor mostram uma recarga de alumínio tanto por influencia do rio quanto pelas áreas adjacentes, pois nesse período há intenso índice de pluviosidade que favorece a recarga de outras regiões.

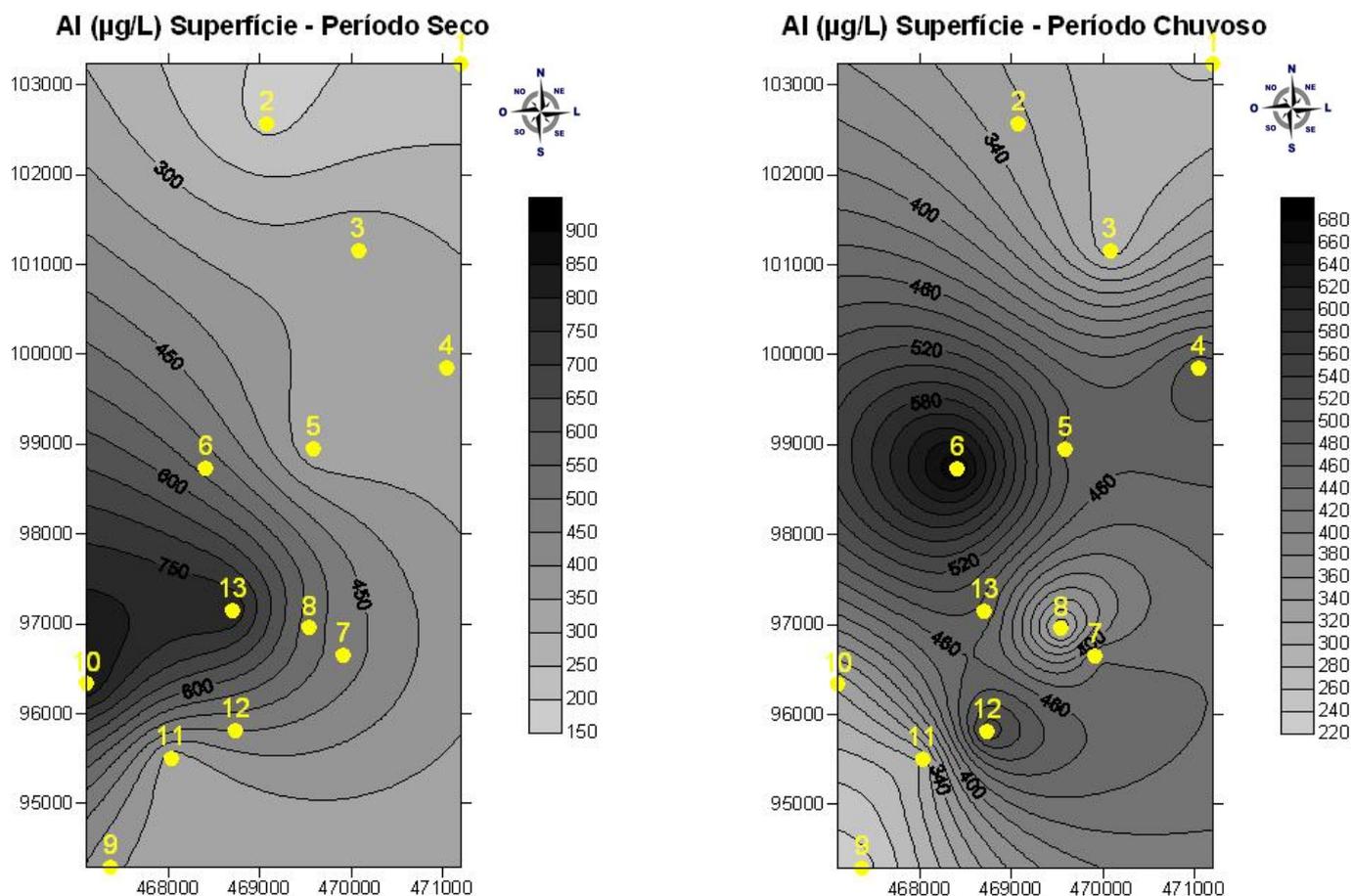


Figura 31 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do alumínio ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.4.2 Manganês

O manganês é um abundante e amplamente distribuído metal. Não é encontrado na natureza em sua forma elementar, mas é encontrado na forma de sais e muitas vezes juntamente com compostos de ferro. Solos, sedimentos e rochas sedimentares e metamórficas são fontes naturais de manganês. O minério de manganês mais importante é a pirolusita (MnO_2). Outros minerais de manganês são carbonato de manganês (MnCO_3) e silicato de manganês (MnSiO_3). O intemperismo de manganês contribui depósitos de pequenas quantidades de manganês de águas naturais. O manganês é semelhante ao ferro em seu comportamento químico e é freqüentemente encontrado em associação com ferro. Em águas naturais, uma fração substancial de manganês está presente em forma de suspensão. Em águas de superfície, manganês bivalente (Mn^{2+})

é rapidamente oxidado a dióxido de manganês insolúvel (MnO_2), que então precipita-se como um sólido negro, muitas vezes observadas como manchas negras nas pedras. Em potável sistemas de distribuição de água, a precipitação de MnO_2 pode causar manchas em louças (Weiner, 2000).

Os teores médios de manganês situaram-se entre $84,06$ e $123,42 \mu g.L^{-1}$, apresento valor mínimo de $34,86 \mu g.L^{-1}$ e valor máximo de $1257,81 \mu g.L^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro manganês apresentado na Figura 33, mostra a recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio. No período chuvoso, temos uma contribuição de recarga de outras áreas. No ponto 08, as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo.

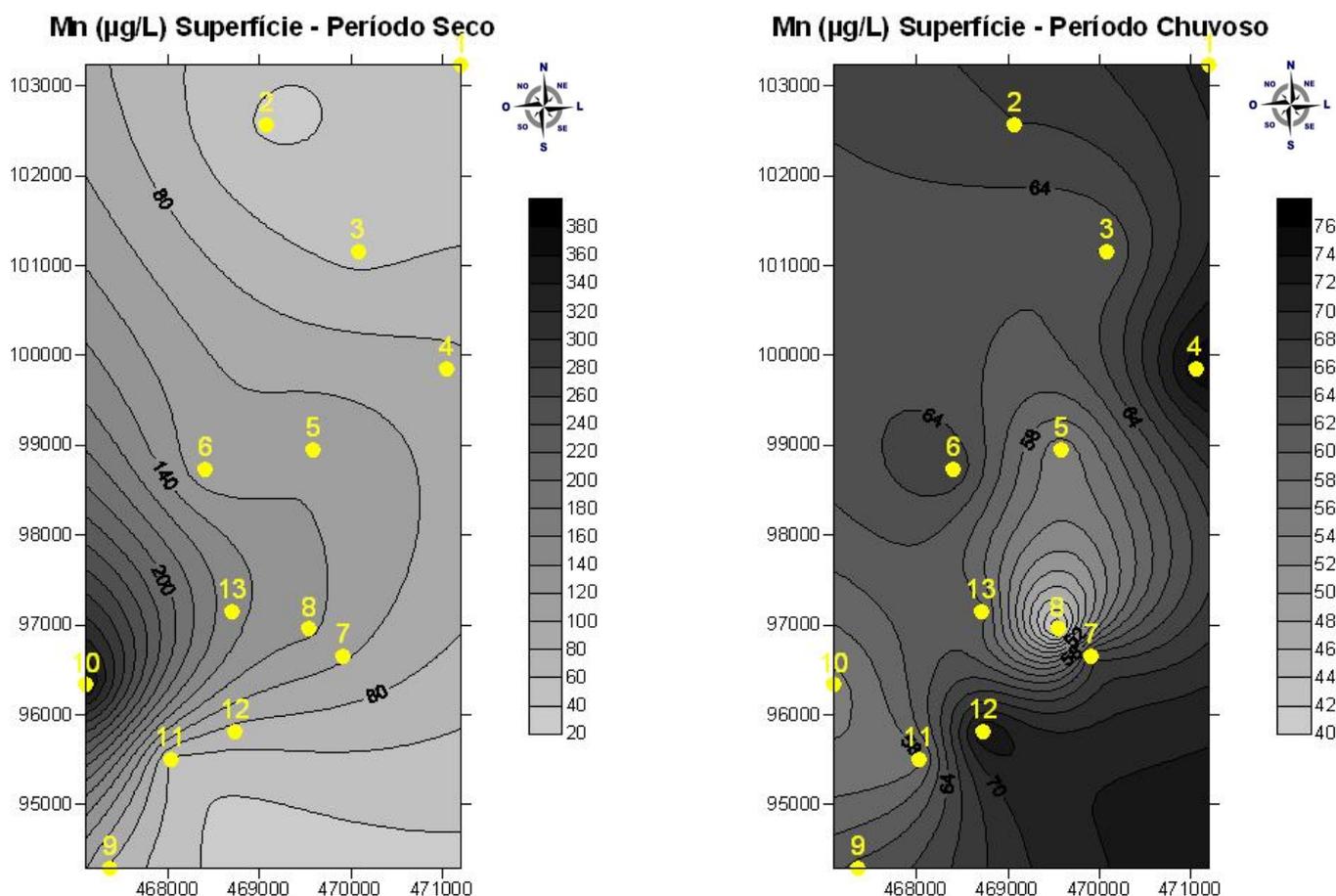


Figura 32 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do manganês ($\mu g.L^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.4.3 Ferro

O ferro é liberado naturalmente em águas pelo intemperismo do minério de ferro contendo pirita (FeS_2) e outros minerais de ferro presente em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. O aumento de sua concentração nas águas tem sua origem em muitas fontes humanas através de: processamento mineral, coque e queima de carvão, drenagem ácida de mina de ferro e resíduos da indústria siderúrgica, e corrosão do ferro e do aço. No ambiente aquático, o ferro está presente em dois estados de oxidação: (ferroso Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}). O estado reduzido ferroso é altamente solúvel na faixa de pH das águas superficiais não poluídas, enquanto que o estado de ferro oxidado está associado com compostos de baixa solubilidade em pH acima de 5 (Weiner, 2000).

Em águas não poluídas, seu teor varia muito em função da litologia da região e do período chuvoso, quando pode ocorrer o carreamento de solos com teores de ferro mais elevados. Confere sabor e coloração avermelha às águas. Sua presença causa depósitos em tubulações. Pode causar manchas em aparelhos sanitários e em roupas durante a lavagem. Pode causar problemas no sistema de distribuição e promover o crescimento de ferrobactérias, causando vômito e prejudicar ao fígado e aos rins.

Os teores médios de ferro situaram-se entre 458,78 e 511,57 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 107,22 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 4455,73 $\mu\text{g.L}^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro ferro apresentado na Figura 34, mostra concentrações elevadas de ferro na área do reservatório, tanto no período seco como no período chuvoso, o período seco apresenta concentrações elevadas, principalmente no ponto 10, onde as linhas de isoteor neste ponto mostram que recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio. Os pontos 8 e 12, as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo.

O mapa hidroquímico do período chuvoso apresenta várias linhas circulares de isoteor, e uma contribuição menos acentuada na entrada do reservatório (ponto 9 e 10).

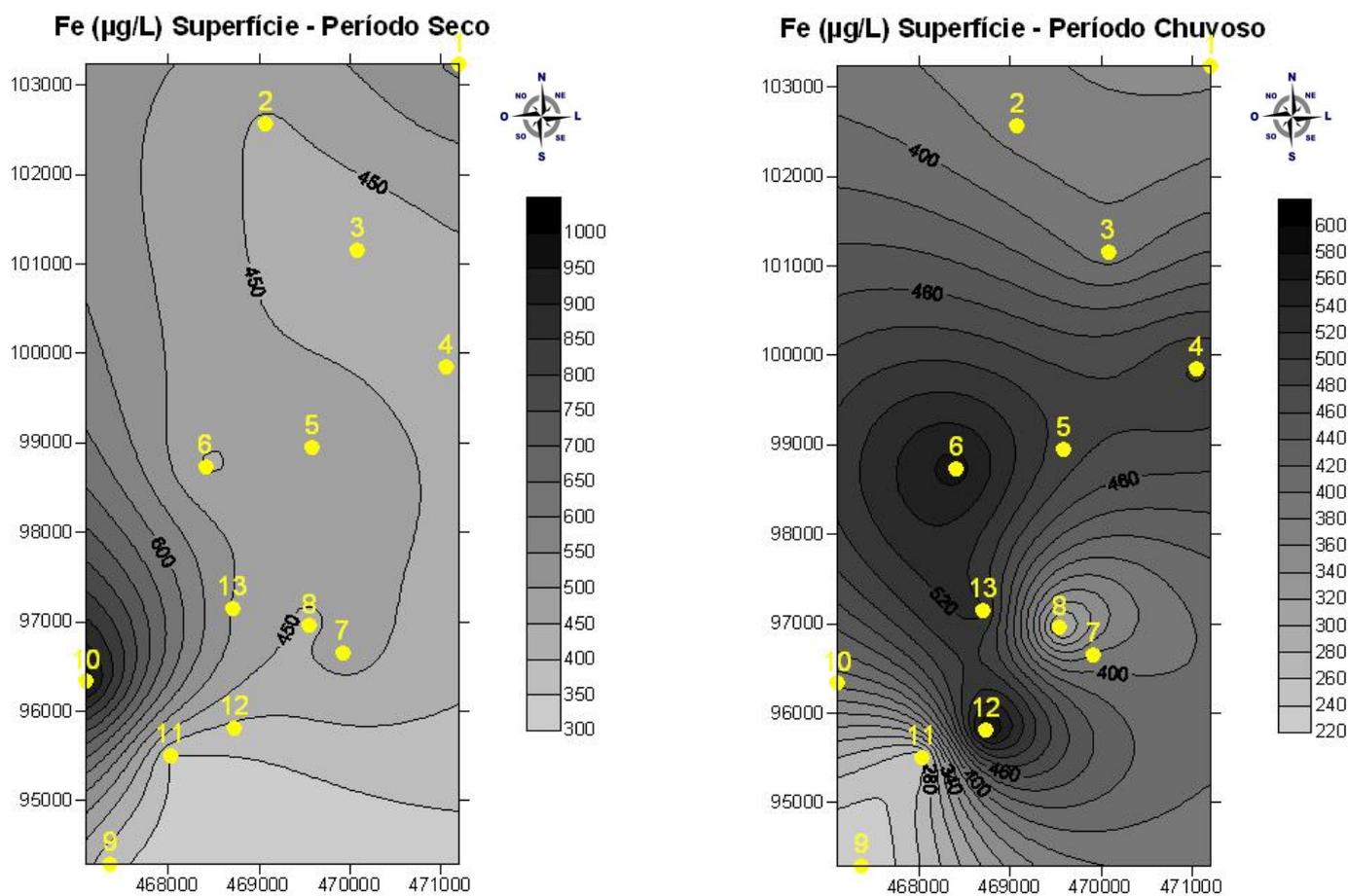


Figura 33 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do ferro ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

6.4.4 Chumbo

Os teores médios de chumbo situaram-se entre $3,86$ e $5,25 \mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de $0,28 \mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de $49,69 \mu\text{g.L}^{-1}$. O mapa hidroquímico do parâmetro sódio apresentado na Figura 35, mostra a recarga deste elemento no reservatório no período seco é proveniente da recarga natural do leito do rio, e mostra nos pontos 7 e 13 as linhas de isoteor se fecham, determinando um comportamento anômalo. No período chuvoso, com a recarga do rio muito diluída, não apresentando entrada de chumbo através do rio, temos uma contribuição de recarga de outras áreas.

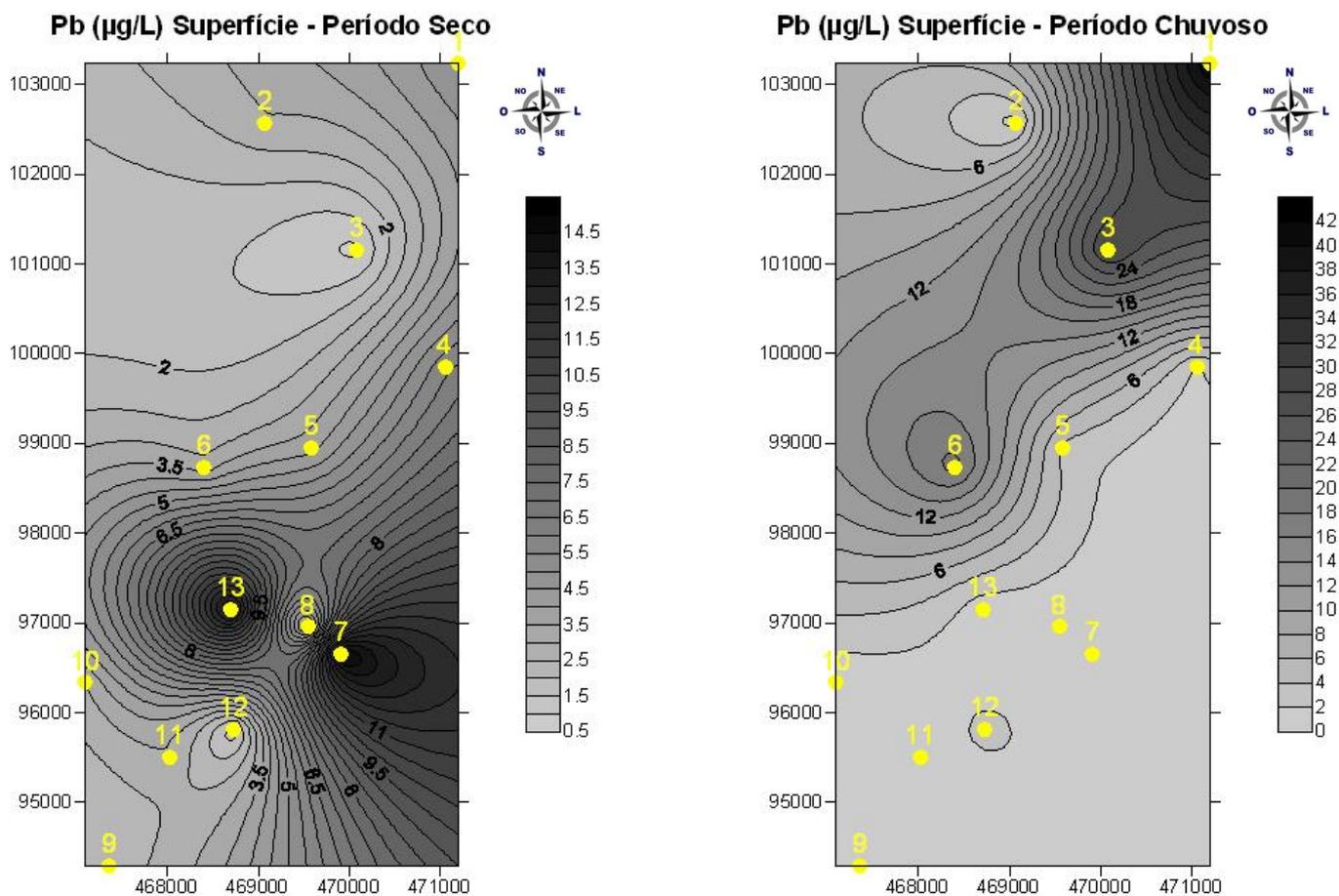


Figura 34 - Mapas hidroquímicos da distribuição da concentração do chumbo ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, no período seco e chuvoso.

Os elementos As, Cd, Cu, Hg, Sr e Zn foram analisados e apresentaram os seguintes resultados:

Os teores médios de Arsênio situaram-se entre $1,00$ e $1,22 \mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de $0,64 \mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de $2,75 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Os teores médios de cádmio situaram-se entre $0,02$ e $0,03 \mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de $0,01 \mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de $0,87 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Os teores médios de Cobre situaram-se entre $1,54 \mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de $0,12 \mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de $20,34 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Os teores médios de Mercúrio situaram-se entre 0,28 e 0,41 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 0,00 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 4,69 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

Os teores médios de estrôncio situaram-se entre 10,42 e 11,31 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 8,19 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 15,93 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

Os teores médios de zinco situaram-se entre 8,79 e 16,27 $\mu\text{g.L}^{-1}$, apresento valor mínimo de 0,24 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e valor máximo de 76,69 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

6.5 HIDROQUÍMICA

6.5.1 Variações hidroquímicas com a profundidade

Os resultados apresentados referem-se principalmente aos álcalis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), além de pH, condutividade, oxigênio dissolvido (OD), íon amônio, Fe, Al e Mn.

A água do reservatório apresentou valores médio de dureza entre 5,61 e 6,09 mg/L CaCO_3 . O pH apresentou resultados variando de 4,48 a 7,13 apresentando valores médios de 6,50, próximo da neutralidade a levemente alcalino. A alcalinidade, expressa pelo HCO_3^- manteve-se entre 9 a 10,8 mg.L^{-1} .

Os teores médios de oxigênio dissolvido situaram-se entre 6,16 e 5,52 mg.L^{-1} . Os menores valores foram obtidos dentro do reservatório e em profundidade, as estações de maior profundidade apresentaram uma tendência a estratificação no perfil da coluna d'água, o menor valor encontrado foi de 1,23 mg.L^{-1} no ponto MCN 02 na quarta campanha.

Na figura 36 apresentamos os valores médios de pH e OD dos pontos de maior profundidade, sendo que cada ponto do reservatório é uma particularidade, para que a região mais profunda apresente uma característica anóxida é necessário que aquele ponto esteja sem nenhuma influencia, a ponto de causar turbulência sobre a coluna d'água, e alguns pontos desse reservatório em estudo conseguem manter essa característica, visto que se trata de um reservatório pequeno de pouca área alagada e com poucas áreas profundas, diferentemente de outros reservatórios, como o de Tucuruí, onde vários pontos amostrais apresentam profundidades acima de 30 metros, chegando até 70 metros de profundidade.

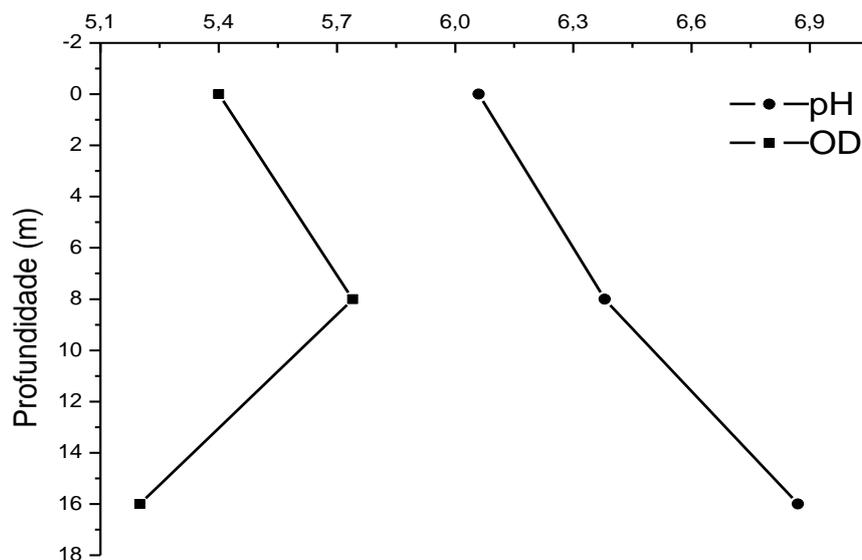


Figura 35 - Valores médios de pH e Oxigênio dissolvido nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório

Na figura 37, está representado os valores médios do íon amônio nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.

A formação da NH_4^+ acontece durante a decomposição da matéria orgânica dissolvida e particulada, tanto por processos anaeróbios, como aeróbios. As menores concentrações de NH_4^+ , observadas em superfície, correspondem ao consumo do íon, fixados nos processos de fotossíntese, sob luz solar intensa (Silva, 2008). A principal forma de nitrogênio analisada foi o íon amônio (NH_4^+) ou amônia, importante para os processos de produção primária. A variação média de NH_4^+ situou-se entre 21,2 e 8,85 $\mu\text{g/L}$, os valores mais elevados encontram-se no período de estiagem.

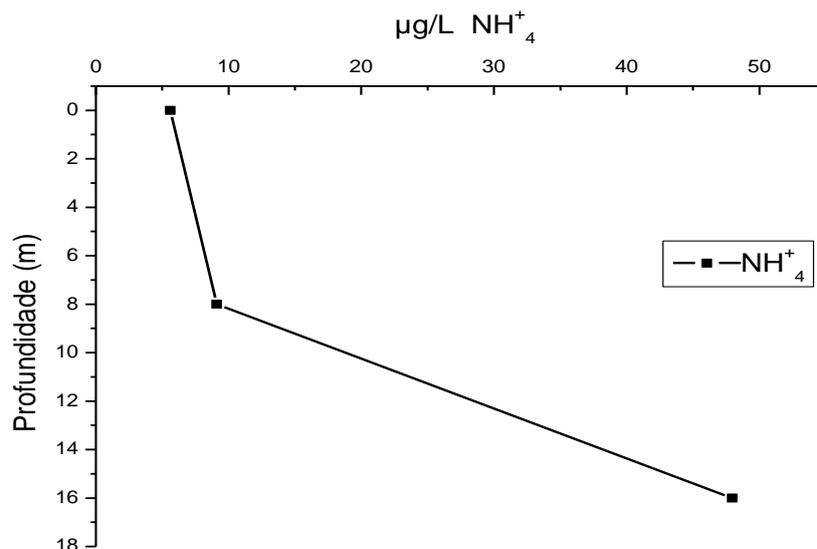


Figura 36 - Valores médios de íon amônio nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório

Como mostra a figura 38, a variação média dos valores de condutividade nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório, demonstra um aumento desse valor deste parâmetro a medida que aumenta a profundidade do ponto amostrado.

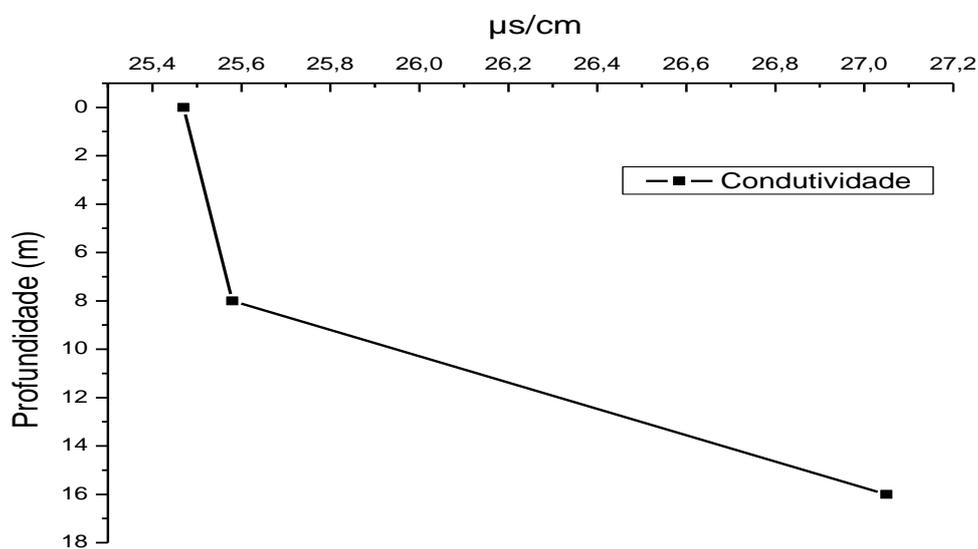


Figura 37 - Valores médios de condutividade nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório

Na figura 39 são apresentados os teores médios de Al, Fe e Mn nos pontos mais profundos do reservatório considerando o período seco e chuvoso. Os resultados apresentados nesta figura indicam uma tendência de aumento de concentração destes elementos no fundo do reservatório. Esse aumento de concentração no fundo do reservatório pode estar associado a liberação destes metais incorporados à partículas em suspensão, com destaque para o ferro. Essa mesma tendência pode ser observado para a condutividade que apresenta comportamento semelhante, figura 38.

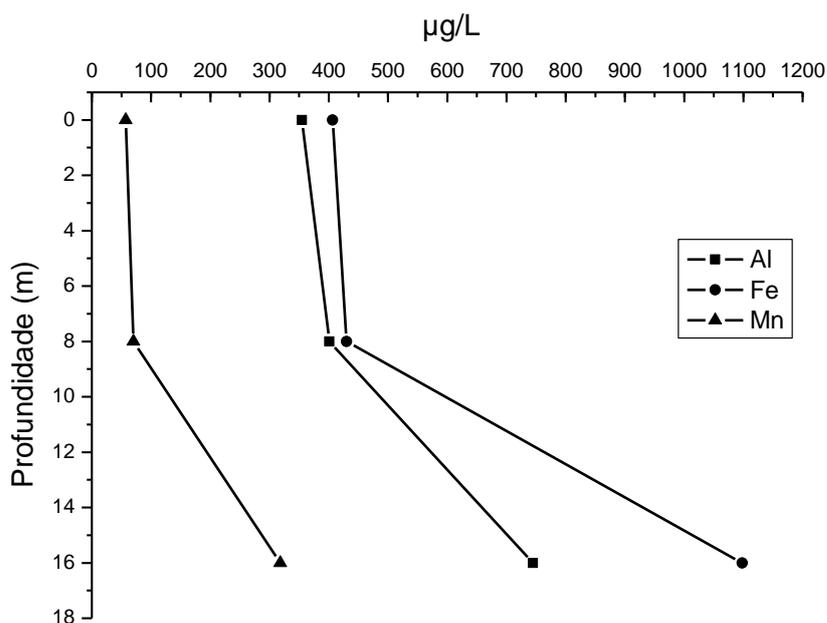


Figura 38 - Valores médios de Al, Fe e Mn nos perfis verticais dos pontos mais profundos do reservatório.

Os teores médios de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ($\mu\text{g/L}$) obedecem a ordem $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. Estes constituintes são considerados conservativos e suas concentrações não mudam muito em função das atividades dos organismos, portanto, não foi observada nenhuma tendência de aumento ou diminuição destes elementos ao entrarem no reservatório. Na figura 38, observamos os valores médios desses elementos dos quatro períodos de coleta.

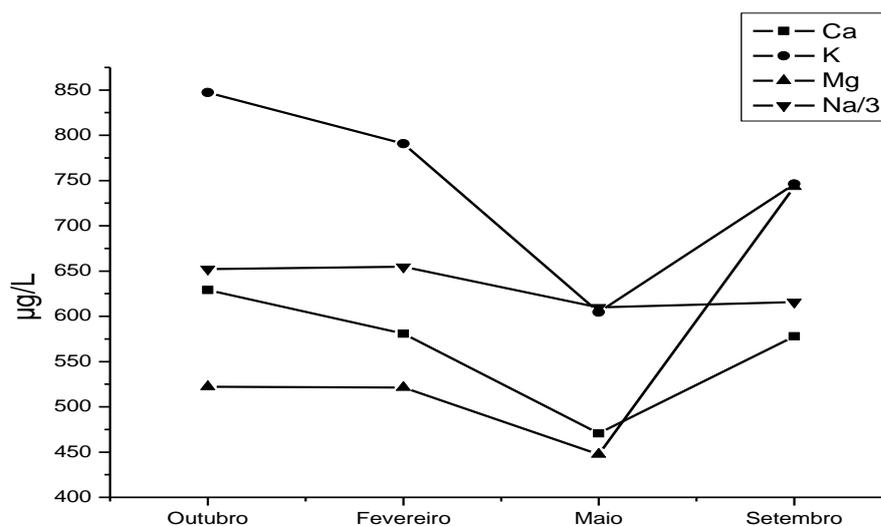


Figura 39 - Comportamento sazonal (média dos valores obtidos) de Ca, K, Mg e Na, nos meses de outubro/08 (seco), fevereiro/09 (chuvoso), Maio/09 (chuvoso) e Setembro/09 (seco).

Nas figuras 41, 42, 43 e 44 são apresentados os valores médios de condutividade, alumínio, manganês e ferro obtidos nas estações de coletas MCN 09, MCN 11, MCN 13, MCN 05 e MCN 04, que correspondem aos pontos longitudinais do reservatório.

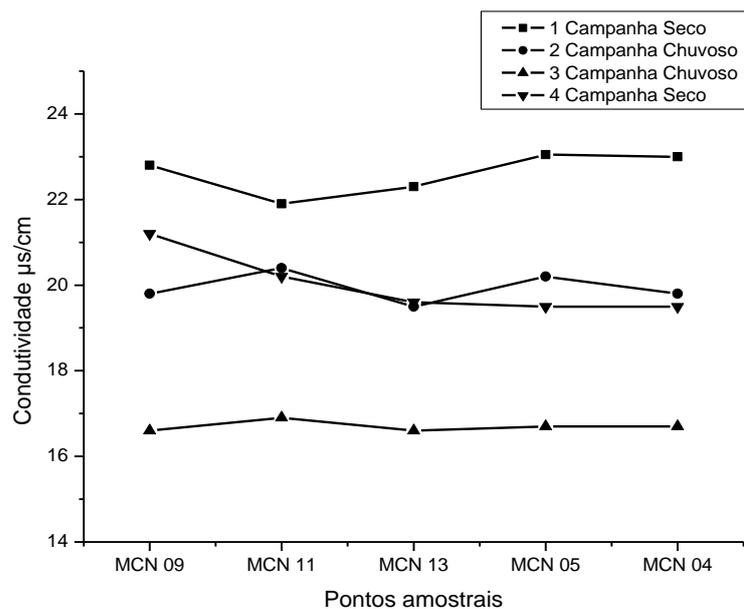


Figura 40 - Variações dos valores médios da condutividade elétrica, das quatro

campanhas ao longo dos pontos longitudinais do reservatório.

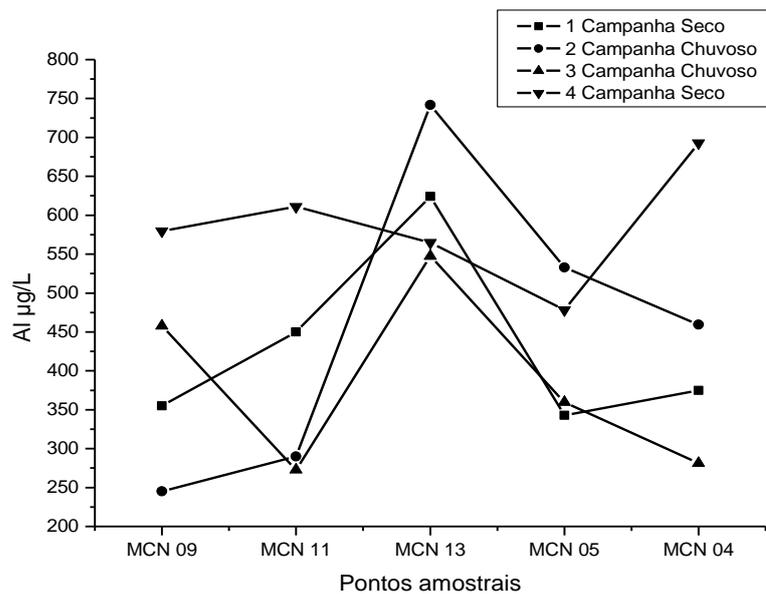


Figura 41 - Variação dos valores médios de teor de alumínio ($\mu\text{g/L}$) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanhas, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).

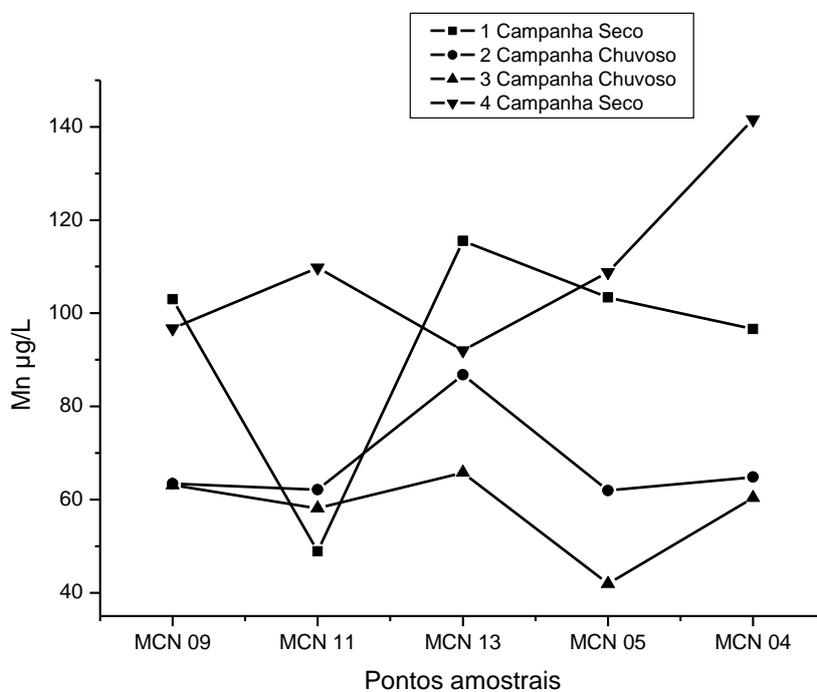


Figura 42 - Variação dos valores médios de teor de Manganês ($\mu\text{g/L}$) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanhas, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).

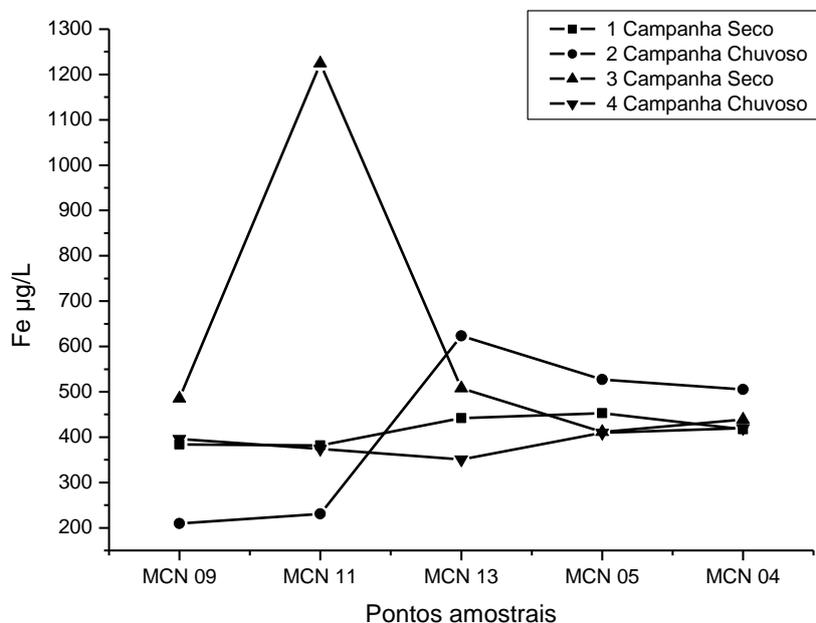


Figura 43 - Variação dos valores médios de teor de Ferro (mg/L) nos pontos longitudinais do reservatório em quatro campanha, apresentados por MCN 09 (entrada do reservatório) e MCN 04 (saída do reservatório).

O reservatório de Coaracy Nunes apresentou uma tendência à estratificação nas estações de coletas mais profundas, indicados pelos pontos MCN 02, MCN 03 e MCN 04, nos demais pontos essa tendência é menos marcada, pois os outros pontos possuem uma profundidade menor.

Ao longo do eixo longitudinal do reservatório não observamos nenhuma tendência do reservatório atuar como um sistema de retenção de substância em relação às que afluem a ele.

Apesar de se situar na entrada da represa o ponto MCN 09, normalmente associadas as características lóxicas, quando comparado com os pontos longitudinais

MCN 11, MCN 13, MCN 05 e até a saída do reservatório no ponto MCN 04, são parecidas as condições lenticas do restante do reservatório.

A Figura 45 mostra o aumento da concentração de ferro e alumínio com o aumento da profundidade na coluna d'água no ponto MCN 02, durante o período de estiagem e a figura 43 mostra o decaimento da concentração de oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade.

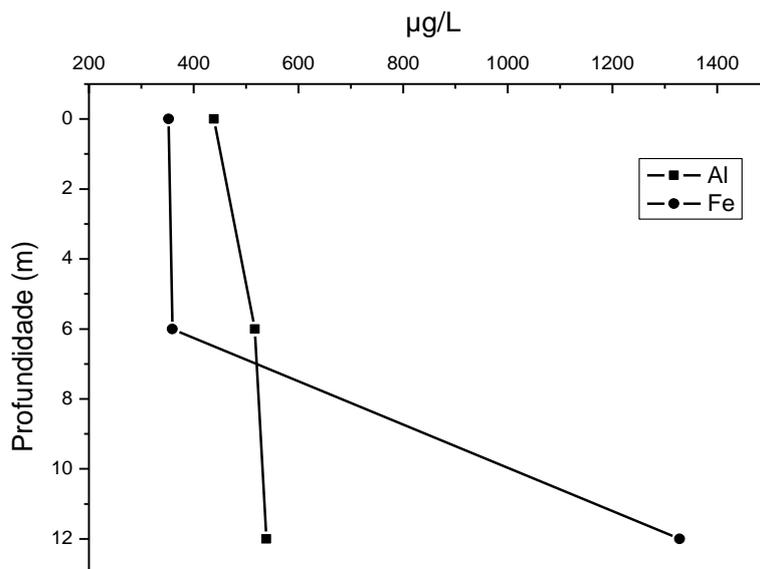


Figura 44 - Relação profundidade com aumento de concentração de Fe e Al.

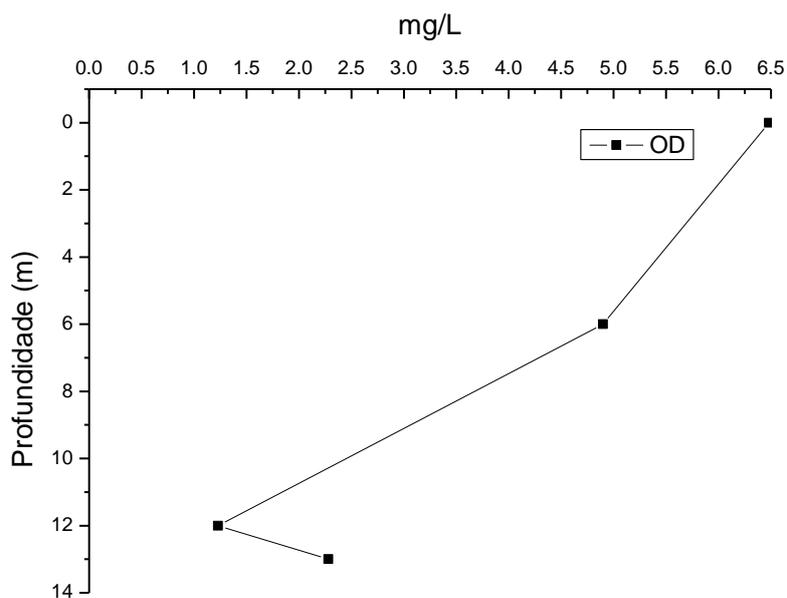


Figura 45 - Relação oxigênio dissolvido com aumento de profundidade no ponto MCN02.

Da mesma forma na Figura 47 mostra o aumento da concentração de ferro e alumínio com o aumento da profundidade na coluna d'água no ponto MCN 03, durante o período de estiagem e na figura 48 mostra a decaimento da concentração de oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade.

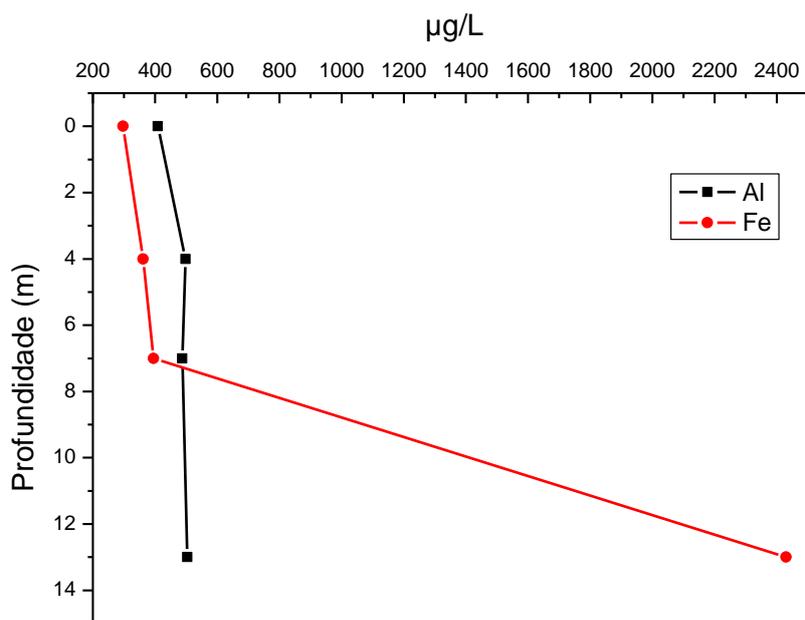


Figura 46 - Relação da profundidade com aumento de concentração de Fe e Al, no ponto MCN 03.

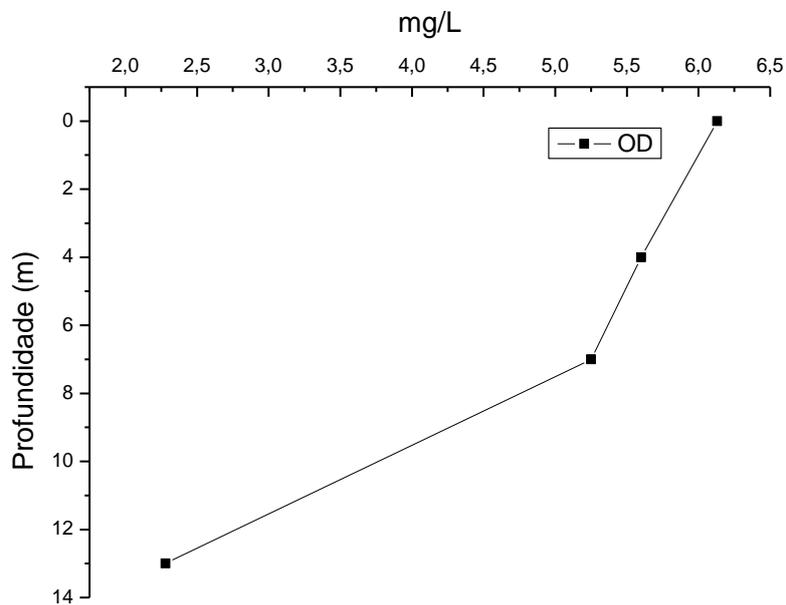


Figura 47 - Relação do oxigênio dissolvido com aumento de profundidade no ponto MCN 03.

Aparentemente, podemos concluir que nas estações de coletas que apresentam profundidades consideráveis (acima de dez metros), identificou-se um aumento na concentração de alguns elementos, como ferro e alumínio, devido a estes elementos entrarem no reservatório incorporados à partículas em suspensão, e ao encontrarem ambiente fortemente redutor microorganismos através de processo anaeróbios contribuem para o aumento da concentração destes elementos com maior destaque para o ferro e em menor escala para o alumínio.

7 CONCLUSÕES

A avaliação das distribuições dos elementos químicos, realizado neste trabalho, permitiu identificar os valores anômalos, dentro do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, as concentrações de alumínio, ferro e manganês se destacam nesse contexto, apresentam concentrações elevadas, uma vez que comparadas com as características químicas das águas da região amazônica.

O reservatório de Coaracy Nunes apresentou uma tendência a estratificação nas estações de coletas mais profundas, indicados pelos pontos MCN 02, MCN 03 e MCN 04, nos demais pontos essa tendência é menos marcada, pois os outros pontos possuem uma profundidade menor.

Ao longo do eixo longitudinal do reservatório não observamos nenhuma tendência do reservatório atuar como um sistema de retenção de substância em relação às que afluem a ele.

Nos pontos amostrais de maior profundidade, o reservatório apresentou diminuição da concentração de oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade, gerando zonas anoxidas no fundo do reservatório, favorecendo a liberação de elementos químicos como Fe e Al, que se encontram incorporados à partículas em suspensão, através de processos anaeróbicos.

De acordo com as interpretações dos mapas hidroquímicos, identificou-se um comportamento característico do período de estiagem, mostrando que a recarga dos elementos químicos no reservatório é proveniente da recarga normal do leito do rio, onde as águas do rio Araguari se encarregam de alimentar as águas do reservatório com esses elementos, justificando a presença de elementos em concentrações consideráveis como alumínio, ferro e manganês, visto que o reservatório é alimentado pelo rio Araguari que possui um afluente chamado Amapari e neste rio localiza-se a cidade Serra do Navio, que durante anos foi o centro da exploração de minério de manganês. Por outro lado, no período chuvoso identificamos um sistema complexo, o alto índice de pluviosidade nessa época mostra vários pontos de recarga no reservatório, onde a água da chuva se encarrega de transportar matérias das áreas adjacentes para dentro do reservatório.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). 2010. *Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil*. Cadernos de Recursos Hídricos. Brasília, DF v. 1. 175 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 2008. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília, DF: ANEEL. 236 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 2002. *Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos*. 3. ed. Brasília, DF: ANA/ANEEL. 326 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1993. *NBR 9896/1993*. General glossary of water pollution – Terminology.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1988. *NBR 10559/1988*. Determinação de oxigênio dissolvido - Método iodométrico de winkler e suas modificações.
- Bárbara, V. F., Cunha, A. C., Siqueira, E. Q. 2005. Análise da qualidade das águas do Rio Araguari (AP) utilizando o sistema de modelagem QUAL2E. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG - CONPEEX, 2005, Goiânia. *Anais eletrônicos do XIII Seminário de Iniciação Científica*. Goiânia: UFG. [1 CD-ROM].
- Batista, B. L., Rodrigues, J. L., Nunes, J. A., Souza, V. C. O., Barbosa JR, F. 2009. Exploiting dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry (DRC-ICP-MS) for sequential determination of trace elements in blood using diluteand-shoot procedure. *Analytical Chimica Acta*, **639**: 13-18.
- Boaventura, F. M. C., Narita, C. 1974. Geomorfologia da Folha NA/NB-22-Macapá. In: PROJETO RADAM. *Folha NA/NB-22-Macapá: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro : DNPM. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.6).
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J.G.L., Barros, M.T.L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., Eiger, S. 2002. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo, SP: Prentice Hall. 305 p.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A.(ELETRONORTE). *Usina de Coaracy Nunes: primeira hidrelétrica da Amazônia completa 30 anos*. Disponível em: <http://www.eln.gov.br/Usinas/Coaracy_Nunes/index.asp>. Acesso em 15/7/2009, às 15:27.
- Chapman, D., Kimstach, V. Selection of water quality variables. In: *Water Quality Assessments – A Guide to Use Biota, Sedimentes and Water in Environmental Monitoring – 2ª ed.*, UNESCO/WHO/UNEP, 1996.

- Costa, J. B. S., Igreja, H. L. S., Borges, M. S., Hasui, Y. 1991. Tectônica mesozóicocenozóica da Região Norte do Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3, 1991, Rio Claro (SP). *Anais...* Rio Claro: SBG/Núcleo de São Paulo. p. 108-109.
- Costa-Neto, S. V. 2004. *Relatório de vegetação: Subsídio ao diagnóstico sócio ambiental*. Relatório Técnico. Macapá: IEPA/GERCO. 32p.
- Costa-Neto, S. V.; Vieira, I. M.; Sarquis, R. do S. R. R.; Tostes, L. de C. V.; Viana, A. F. 2003. Dinâmica e estrutura dos manguezais do rio Sucuriçu, Amapá, Brasil. In: MANGROVE 2003. Resumo. p.60
- Cunha, 2003. Determinação do coeficiente de reaeração com uso do Modelo QUAL2E para estudos de impactos ambientais do Rio Araguari-AP. Projeto de Pesquisa CPAQ/IEPA e SETEC/CNPq. Projeto de Pesquisa. IEPA – AP. 40 p. 2003
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). 1974. PROJETO RADAM. *Folha NA/NB.22-Macapá*; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, Brasil..
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2007. *Geração hidrelétrica: potencial hidrelétrico Brasileiro*. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE.
- Esteves, F.A. 1998. *Fundamentos de limnologia*. 2a ed., Rio de Janeiro: Interciência: FINEP.
- Giné-Rosias, M. F. 1999. *Espectrometria de massas com fonte de plasma acoplado*. [S.l.]: Ed. CPG/CENA, nov.
- González, A. G., Herrador M. A. 2007. A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles, *Trend in Analytical Chemistry*, v. 26, (3): 227-237.
- Gonçalves, E, Serfaty, A. 1976. Perfil analítico do manganês. Brasília: DNPM.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2008. Informações do estado do Amapá. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=ap>>. Acesso em: 14/7/2008, às 8:31.
- Jarvis, K. E., Gray, L. A., Houk, ? . 1992. Handbook of Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry, Ed, Blackie, New York,
- Junk, W. J. ; Mello, J. A. S. N. de. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. *Turbinger Geographischer Studien*. 93, 367-385, 1987.
- Landim, P.M.B., Sturato, J.R. KRIGAGEM INDICATIVA APLICADA À ELABORAÇÃO DE MAPAS PROBABILÍSTICOS DE RISCOS. UNESP/campus de Rio Claro Departamento de Geologia Aplicada, 2002.

- Lemes, M.J.L. 2001. Avaliação de metais e elementos-traço em águas e sedimentos das bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, São Paulo.
- Lima, M. I. C., Bezerra, P. E. L., Araújo, H. J. T. 1991. Sistematização da geologia do estado do Amapá. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., 1991, Belém. Anais... Belém: SBG-Núcleo Norte, p. 322-335.
- Montaser A. 1998. Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry, USA.
- Monteiro, M. A.; Coelho. M. C. N.; Silva, R.P. A ICOMI no Amapá. Observatório social. Relatório geral de observação, março de 2003.
- Monteiro, A. M. 2005. Modernização, técnica moderna e risco ambiental: o caso da valorização do manganês da serra do navio, Pesquisador e Professor do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos da Universidade Federal do Pará.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Sistema Nacional de Gerenciamento de 2004. Recursos Hídricos.
- Mortatti, J. Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanço. 1995. Tese (Livro-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 155p.
- Pereira, J.R. 2004. Exploração do potencial hidrelétrico da Amazônia: possibilidades e limitações”. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Amazonas.
- Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007.
- PROGRAMA DE ESTUDOS E PESQUISAS NOS VALES AMAZÔNICOS. (PROVAM). 1990. Belém, PA: Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia-SUDAM/OEA. v. 1. 189 p.
- Santos S. B. 2007. *Elementos traço em soro sanguíneo medidos pelo método de PIXE e ICP-MS*. 2007. 147p. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Saraiva A. C. F. 2002. Estudo dos impactos ambientais provocado por atividade mineradora no estado do Amapá. Dissertação (mestrado em ciências ambientais) - Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, 154p.
- Scarpelli W. 2003. Arsênio do minério de manganês da Serra de Navio. Novos Cadernos –NAEA, **6** (1): 101-133, jun.
- Silva U.R.L. [2003?]. *Aspectos socioeconômicos das comunidades localizadas entre a foz do rio Araguari e a foz do rio Amapá grande*. GERCO/AP, Centro de Pesquisas Aquáticas – CPAq – Macapá – AP.
- Silva, J. F. B. 2008. *Hidrogeoquímica do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí*. Museu Paraense Emílio Goeldi.(Relatório Técnico)

- Silveira O. F. M. 1998. A Planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 215p.
- Souto F.A.F. 2009. Avaliação das características físicas, químicas e mineralógicas da matéria-prima utilizada na indústria de cerâmica vermelha nos municípios de Macapá e Santana-AP. 103p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará.
- Skoog D. A. & Holler F. J. & Nieman T. A. 2002. Princípios de Análise Instrumental, 5ª Ed Bookman, 2002.
- STANDART methods for examination of water. 2005a. Collection and preservation of samples, 1060B. 21th Edition.
- STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 2005b. *Conductivity*, Laboratory Method, 2510 B. 21th Edition.
- STANDART methods for examination of water. 2005c. *Hardness*, 2340c. 21th Edition.
- STANDART methods for examination of water. 2005d. *Inductively coupled plasma-mass spectrometry*, 6020A. 21th Edition.
- STANDART methods for examination of water. 2005e. *Nitrogen (AMMONIA) Phenate Method*, 4500-NH₃f. 21th Edition.
- STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 2005f. *Temperature*. Laboratory and field methods, 2550 B. 21th Edition.
- STANDART methods for examination of water. 2005. *Total suspended solids dried at 103–105°C*, 2540d. 21th Edition.
- Tucci, C.E.M., Hespanhol, I., Cordeiro Neto, O.M. 2001. Gestão da água no Brasil. Brasília, DF: UNESCO. 190 p.
- Tundisi, J.G. 1994. Diagnóstico ambiental das represas da Amazônia. ELETROBRÁS/COOPE/ CHHEA-USP. *Limnologia*, Ago.
- Tundisi J.G. & Straskraba M. 1999. Theoretical Reservoir ecology and its applications. Brazilian academy of Sciences, internacional Instituto f Ecology and Backhuys Publishers, 585 p.
- Viana J.P. 2002. Physical and chemical post-dam alterations in the Jamari river, a hydroelectric-developed river of the Brazilian Amazon. In: *Hydrobiologia Journal*. Local: Printed in the Netherlands Editor. Kluwer Academic Publishers. p 235-247.
- Weiner, Eugene R. 2000. *Applications of environmental chemistry: a practical guide for environmental professionals* / Eugene R. Weiner. Includes index.1. Environmental chemistry.