

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA



Resumo Executivo

República Federativa do Brasil

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

Ministério do Meio Ambiente

Edson Duarte

Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Tibério Magalhães Pinheiro (Superintendente)

Victor Sucupira (Superintendente Adjunto)

Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

Leonardo de Almeida (Gestor Substituto do Contrato)

Márcia Tereza Pantoja Gaspar (Gestora do Contrato)

© 2018 Agência Nacional de Águas – ANA

Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T
CEP: 70610-200, Brasília - DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Capa, projeto gráfico e diagramação: Vanessa Cardoso
Local da fotografia: Mangal das Garças – Belém/PA
Autores das Fotografias: Ângelo Matos e Cristiano Cantão

Equipe:

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF

Márcia Tereza Pantoja Gaspar (ANA)	Leonardo de Almeida (ANA)	
Márcia Helena D'Oliveira Nascimento (SEMAS/PA)	Juvenal Andrade Neto (SEMAS/PA)	Luciene Mota de Leão Chaves (SEMAS/PA)
Homero Reis de Melo Junior (CPRM)	Manoel Imbiriba Junior (CPRM)	Valmor José Freddo Filho (CPRM)
Raimundo Nonato do Espírito Santo (UFPA/IG)	Ronaldo Lopes Mendes (UFPA/NUMA)	Giovanni Chaves Penner (UFPA/ITEC)
Wanderley Nascimento da Silva (COSANPA)	Alessandra Machado Noronha (AMAE)	Hélida Gonçalves Soares (SEMMA Belém)
Edivan de Jesus Souza (SEMMA Marituba)	Fernando Monteiro da Silva (SEMMA Marituba)	Rosângela Maria L. da Rocha (SEMMA Marituba)
Alexsandra Christine Borges de Queiroz (SEMMA Marituba)	Ricelly Luciana Luz Maia do Rosário (SEMMA Santa Izabel do Pará)	Carla Marques de Oliveira (SEMMA Santa Bárbara do Pará)

Elaboração e Execução – PROFILL Engenharia e Ambiente S.A.

Mauro Jungblut – Coordenação Geral
Cíntia Letícia Sallet – Gerente de Projetos

Membros da Equipe Técnica Executora:

Flávio de Paula e Silva e Tiago Vier Fischer – Coordenação Técnica
Antônio Flavio Uberti Costa Antônio Silvio Jornada Krebs Ana Luiza Helfer
Carla Gasparini Carlos Bortoli Daniel Wiegand
Guilherme Joaquim Igor Alves Isabel Rekowski
Marcia Regina Stradioto Neomar Oliveira Fraga Rodrigo Tusi Costa
Sidnei Agra

Agradecimentos

Agradecemos a todos os colaboradores e usuários de recursos hídricos que direta ou indiretamente contribuíram com a elaboração deste trabalho.

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

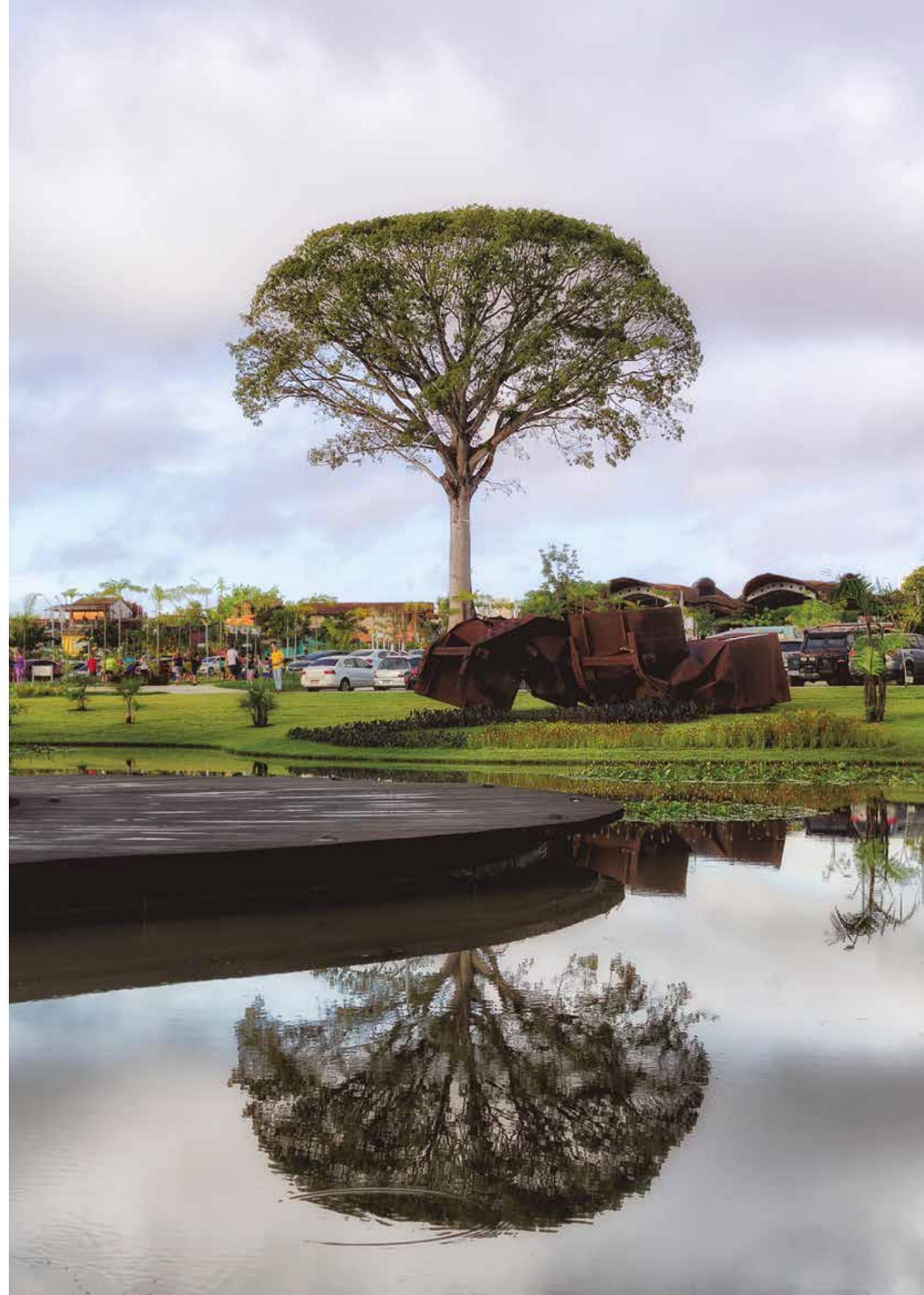
A265e Agência Nacional de Águas (Brasil).
Estudos Hidrogeológicos para a Gestão das Águas Subterrâneas da
Região de Belém/PA: Resumo Executivo / Agência Nacional de Águas; Elabo-
ração e Execução: Profill Engenharia e Ambiente S.A – Brasília: ANA, 2018.

128 p. il.

Conteúdo: v.1. Diagnóstico do meio físico da região de Belém/PA – v. 2, t 1.
Hidrogeologia dos sistemas aquíferos da região de Belém/PA: Resultados em
hidrogeologia – v. 2, t. 2. Hidrogeologia dos sistemas aquíferos da região de
Belém/PA: Impactos da urbanização nas águas subterrâneas – v. 3. Plano de
gestão para as águas subterrâneas da região de Belém/PA.

1. Hidrogeologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. Belém, Região metropolitana de
(PA). I. Título

CDU 556.3



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
	LOCALIZAÇÃO.....	17
	ATORES	18
	CONTEXTO GEOPOLÍTICO E POPULACIONAL	19
2	ESTUDOS TEMÁTICOS	22
	CLIMA E HIDROLOGIA.....	24
	Precipitação.....	24
	Avaliação Hidrológica.....	26
	GEOLOGIA E TECTÔNICA	28
	GEOMORFOLOGIA E SOLOS.....	34
	USOS DA TERRA.....	36
	IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	36
	Abastecimento de água	38
	Esgotamento sanitário.....	42
3	LEVANTAMENTOS DE CAMPO	48
	CADASTRO DE PONTOS D'ÁGUA	50
	FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO.....	51
	INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS.....	53
	ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO	56
	HIDROGEOQUÍMICA.....	58
	TESTES DE AQUÍFERO	67
4	AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	72
	SISTEMAS AQUÍFEROS	74
	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	78
	RECARGA E BALANÇO HÍDRICO	81
	RESERVAS E DISPONIBILIDADES.....	84
	VULNERABILIDADE NATURAL E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO	87
5	ESTRATÉGIAS DE GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA	94
	SUBSÍDIOS TÉCNICOS PARA O APROVEITAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	96
	ZONEAMENTO DA EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	97

6	PLANO DE GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	100
	COMPONENTE 1: PLANEJAMENTO E GESTÃO	102
	Proposta de divisão em Unidades de Gestão.....	102
	Complementação e aperfeiçoamento da legislação vigente e diretrizes para os instrumentos de gestão	107
	Articulação com planos e projetos setoriais	110
	COMPONENTE 2: FORTALECIMENTO INSTITUCIONAL.....	112
	Proposta de arranjo e fortalecimento institucional	112
	Proposta de aperfeiçoamento do quadro técnico.....	113
	COMPONENTE 3: MONITORAMENTO	113
	Proposta de rede de monitoramento quali-quantitativa.....	113
	Plano de monitoramento das águas subterrâneas.....	116
	COMPONENTE 4: PROTEÇÃO E CONSERVAÇÃO	116
	Indicação de Áreas de Proteção da Zona de Recarga dos Aquíferos	116
	Indicação de Áreas de Restrição e Controle.....	118
	COMPONENTE 5: INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS	119
	Diretrizes para o setor de infraestrutura e saneamento	119
	Alternativas de incremento de água para abastecimento público.....	120
	Perímetros de proteção de poços de abastecimento público.....	120
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122



APRESENTAÇÃO

Este Resumo Executivo apresenta uma síntese dos “Estudos Hidrogeológicos para Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/PA”, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), na escala 1:50.000, e executado pela Empresa Profill Engenharia e Ambiente S.A.

Esses estudos consideraram o objetivo específico “Identificar e elaborar estudos em aquíferos de áreas urbanas onde a água subterrânea é relevante para o abastecimento humano”, previsto no segundo ciclo da Agenda de Ações para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneas da ANA, a qual reflete as atribuições da Agência, indicadas no Programa Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS), do Plano Nacional de Recursos Hídricos.

A área de estudo, que abrange os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará, possui uma superfície de 2.536,9 km², abastecida pelas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, além dos mananciais superficiais presentes no entorno.

O projeto teve a supervisão da Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização (CTAF), constituída para avaliar e acompanhar o desenvolvimento dos estudos juntamente com a ANA.





V24

INTRODUÇÃO





Os Estudos Hidrogeológicos para Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/PA foram desenvolvidos no intuito de avançar na compreensão das características dos aquíferos existentes na área de estudo, para, em conjunto com as avaliações dos usos da água e das condições de urbanização, subsidiar a proposição de diretrizes para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos da região.

Sua execução contou com nove etapas metodológicas: mobilização e plano de trabalho; estado da arte (multitemática e multidisciplinar); avaliação do meio físico; levantamento hidrogeológico (dados primários); modelo hidrogeológico; avaliação hidrogeológica; avaliação das atividades antrópicas; vulnerabilidade natural e perigo de contaminação; e, proposta de plano de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

As atividades desenvolvidas ao longo do projeto propiciaram o acesso a uma quantidade expressiva de informações inéditas, que vêm a contribuir não apenas com o presente estudo, mas com o conhecimento técnico disponível na área.

Atividades

Estado da Arte	Cadastro de pontos d'água	Cadastro de fontes potenciais poluidoras
Mapeamento do uso e ocupação da terra	Levantamentos geofísicos	Ensaio de infiltração
Testes de Aquífero	Avaliação climatológica hidrológica	Análises hidrogeoquímicas
Recargas, reservas, potencialidades	Vulnerabilidade natural e perigo de contaminação	Avaliação dos impactos da urbanização
Balanco hidrogeológico	Modelagem conceitual e computacional	Proposta de plano de gestão dos recursos hídricos subterrâneos

LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se na Amazônia, região Norte do Brasil. Situa-se no nordeste do Estado do Pará, e será denominada Região de Belém, abrangendo os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará.



Localização da área de estudo.

Localização da área de estudo.

Embora totalize uma área de 2.536,9 km², cabe destacar que essa área inclui uma porção submersa não contemplada pelos levantamentos previstos no projeto. Assim sendo, a área efetivamente estudada corresponde a 1893 km².

População e área de Belém e municípios adjacentes.

Município	População Estimada (IBGE, 2016)	Área (km ²) (IBGE, 2015)
Ananindeua	510.834	190,451
Belém	1.446.042	1.059,458
Benevides	59.836	187,826
Marituba	125.435	103,343
Santa Bárbara do Pará	20.077	278,154
Santa Izabel do Pará	67.686	717,662
Total	2.229.910	2.536,894



ATORES

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF

Comissão técnica composta por representantes da ANA e profissionais indicados pelos órgãos parceiros em nível federal, estadual e municipal, para avaliar e acompanhar os estudos desenvolvidos.

ÓRGÃO	TÉCNICO
Agência Nacional das Águas	Marcia Tereza Pantoja Gaspar
	Leonardo de Almeida
Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará	Marcia Helena D'Oliveira Nascimento
	Juvenal Andrade Neto
	Luciene Mota de Leão Chaves
Serviço Geológico do Brasil	Homero Reis de Melo Junior
	Manoel Imbiriba Junior
	Valmor José Freddo Filho
Universidade Federal do Pará	Raimundo Nonato do Espírito Santo – Instituto de Geociências
	Ronaldo Lopes Mendes – Núcleo de Meio Ambiente
	Giovanni Chaves Penner – Instituto de Tecnologia
Companhia de Saneamento do Pará	Wanderley Nascimento
Agência Reguladora Municipal de Águas e Esgotos de Belém	Alessandra Machado Noronha
Secretaria Municipal de Meio Ambiente - Belém	Hélida Gonçalves Soares
Secretaria Municipal de Meio Ambiente – Marituba	Edivan de Jesus Souza
	Fernando Monteiro da Silva
	Rosângela Maria L. da Rocha
	Alessandra Christine Borges de Queiroz
Secretaria Municipal de Meio Ambiente – Santa Izabel do Pará	Ricelly Luciana Luz Maia do Rosário
Secretaria Municipal de Meio Ambiente – Santa Bárbara do Pará	Carla Marques de Oliveira

Números da CTAF		
10 órgãos participantes	2 órgãos estaduais	20 técnicos do serviço público, especialistas da ANA, colaboradores de universidades
5 órgãos municipais	3 órgãos federais	16 Reuniões
2 Seminários de gestão participativa		

CONTEXTO GEOPOLÍTICO E POPULACIONAL

O contexto geopolítico da área de estudo inclui a capital do Estado do Pará e parte da Região Metropolitana de Belém (RMB), a qual exclui, para fins deste projeto, apenas o Município de Castanhal.

Observa-se, da década de 1970 até os dias atuais, uma redução da concentração da população no Município de Belém, o que relaciona-se tanto à baixa taxa de crescimento populacional da Capital, quanto ao crescimento mais acentuado nas cidades do entorno.

Taxa de crescimento anual da população por município..

Unidade Territorial	1970/1980	1980/1991	1991/2000	2000/2010
Ananindeua	11,33	2,68	18,09	2,04
Belém	3,95	2,65	0,32	0,94
Benevides	4,87	10,73	-7,02	4,24
Marituba	...	...	...	4,25
Santa Bárbara do Pará	...	...	...	4,66
Santa Izabel do Pará	4,26	3,01	2,93	3,61
Total	4,31	2,92	2,80	1,50

Fonte: Calculado a partir de IBGE - Censo Demográfico.



O crescimento populacional observado no período entre 1970 e os dias atuais é de aproximadamente 685.616 habitantes em 1970, para 2.229.910 habitantes, respectivamente.

População residente por município.

Unidade Territorial	1970	1980	1991	2000	2010	2016*
Ananindeua	22.527	65.878	88.151	393.569	471.980	510.834
Belém	633.374	933.280	1.244.689	1.280.614	1.393.399	1.446.042
Benevides	13.867	22.315	68.465	35.546	51.651	59.836
Marituba	...	...	...	74.429	108.246	125.435
Santa Bárbara do Pará	...	...	...	11.378	17.141	20.077
Santa Izabel do Pará	15.848	24.044	33.329	43.227	59.466	67.686
Total	685.616	1.045.517	1.434.634	1.838.763	2.101.883	2.229.910

Fonte: IBGE - Censo Demográfico. * IBGE - Estimativa da população residente enviada ao Tribunal de Contas da União, referente à data de 1º de julho de 2016.

Devido ao aumento da população e redução das áreas mais propícias à construção de moradias, nas últimas décadas destacaram-se dois processos de ocupação: verticalização, a qual ocorre em áreas de melhor situação quanto à infraestrutura urbana; e favelização, a qual ocorre em locais onde normalmente estão ausentes os serviços básicos, piores condições de infraestrutura e também de renda.





2

ESTUDOS
TEMÁTICOS

CLIMA E HIDROLOGIA

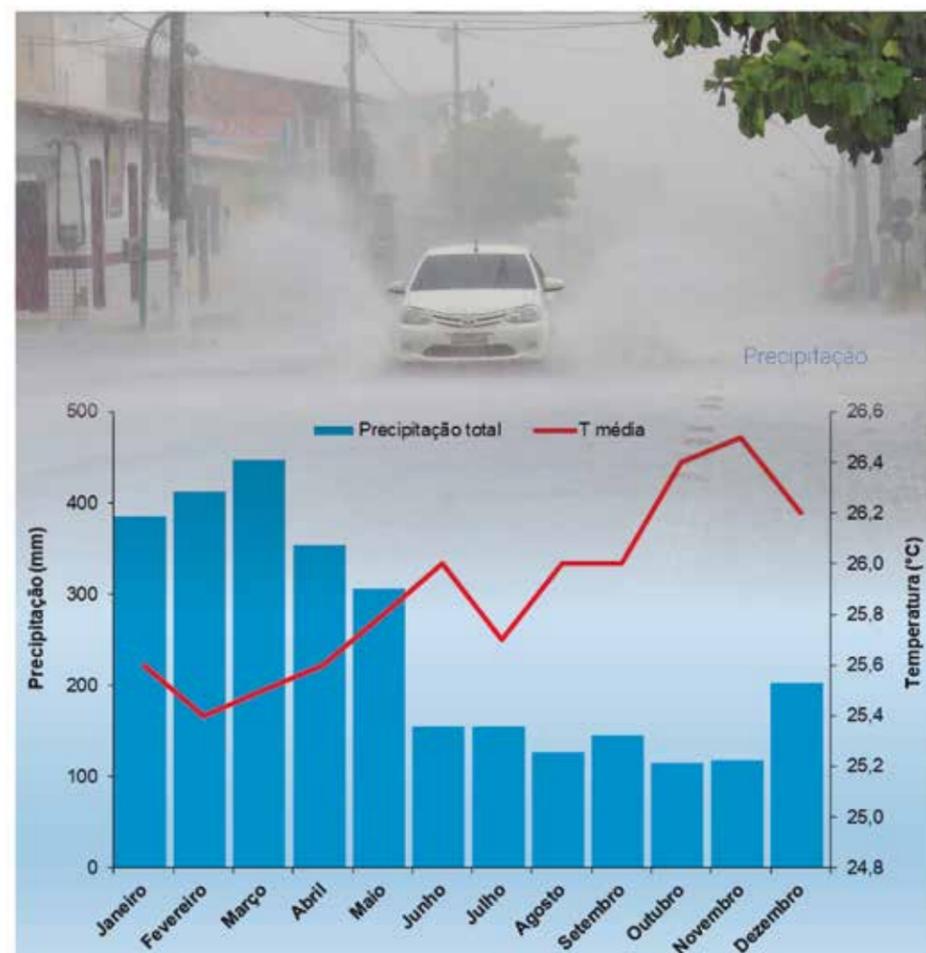
Segundo o sistema de classificação global dos tipos climáticos, proposto por Köppen-Geiger, a área de estudo está inserida na categoria Equatorial Quente Úmido, com clima tropical chuvoso, temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (A). As chuvas são abundantes durante o ano todo, com totais pluviométricos mensais médios iguais ou superiores a 80 mm (F) e com baixa oscilação anual de temperatura (i), ou seja, clima Afi.

Localizada às margens da Baía de Guajará, a região de Belém dista cerca de 130 km do Oceano Atlântico, com uma altitude média de 12 m. Juntamente às baixas altitudes observadas, a fisiografia destaca a presença de inúmeros pequenos corpos de água, o que condiciona à região um ambiente climático quente e úmido (EMBRAPA, 2002).

Precipitação

A região de Belém caracteriza-se por mostrar altos índices pluviométricos anuais (precipitação média anual de 2,639 mm), devido à sua localização na zona equatorial do globo.

A caracterização pluviométrica da área foi realizada a partir da seleção de oito estações pluviométricas que possuem um intervalo de dados coincidente de 34 anos consecutivos de 1983 a 2016.



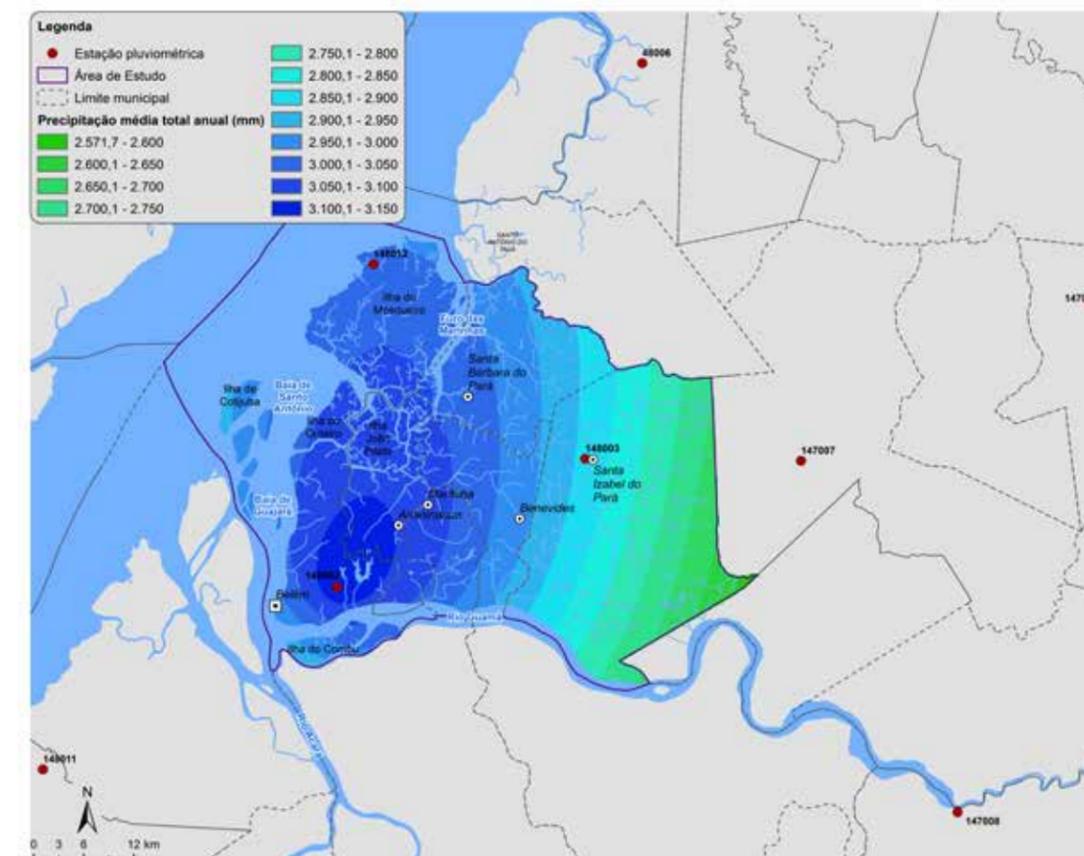
Precipitação média total nas estações pluviométricas da área de estudo e entorno (1983-2016).

Estação	Nome da Estação	Município	UF	Precipitação Média Total (mm)
00048006	VIGIA	VIGIA	PA	2739
00147007	CASTANHAL	CASTANHAL	PA	2534
00147008	SÃO DOMINGOS DO CAPIM	SÃO DOMINGOS DO CAPIM	PA	2216
00147010	IGARAPÉ-AÇU	IGARAPÉ-AÇU	PA	2403
00148002	BELÉM	BELÉM	PA	3157
00148003	SANTA ISABEL DO PARÁ	SANTA ISABEL DO PARÁ	PA	2891
00148011	VILA DO CONDE	BARCARENA	PA	2143
00148012	MOSQUEIRO	BELÉM	PA	3027
Precipitação Média (mm)				2639

O maior valor registrado nos pluviômetros consultados foi de 4.045 mm, no ano de 1985 (Santa Isabel do Pará), e o menor foi de 1,247 mm, no ano de 2000 (Mosqueiro).

A precipitação registra-se como mais expressiva de leste para oeste, em direção às margens dos principais cursos d'água superficiais na região de Belém.

Mapa de isoietas ou linhas de igual precipitação (mm) na área de estudo



As vazões totais apresentadas na última linha são apenas indicativas da disponibilidade hídrica total da região, visto que as bacias são isoladas, contribuindo diretamente para rios de fora da área de estudo, ou para a baía. Não há um ponto de acúmulo das bacias hidrográficas onde, efetivamente, se observe as vazões totais médias de 29,29 m³/s ou com 95% de permanência, de 9,47 m³/s.

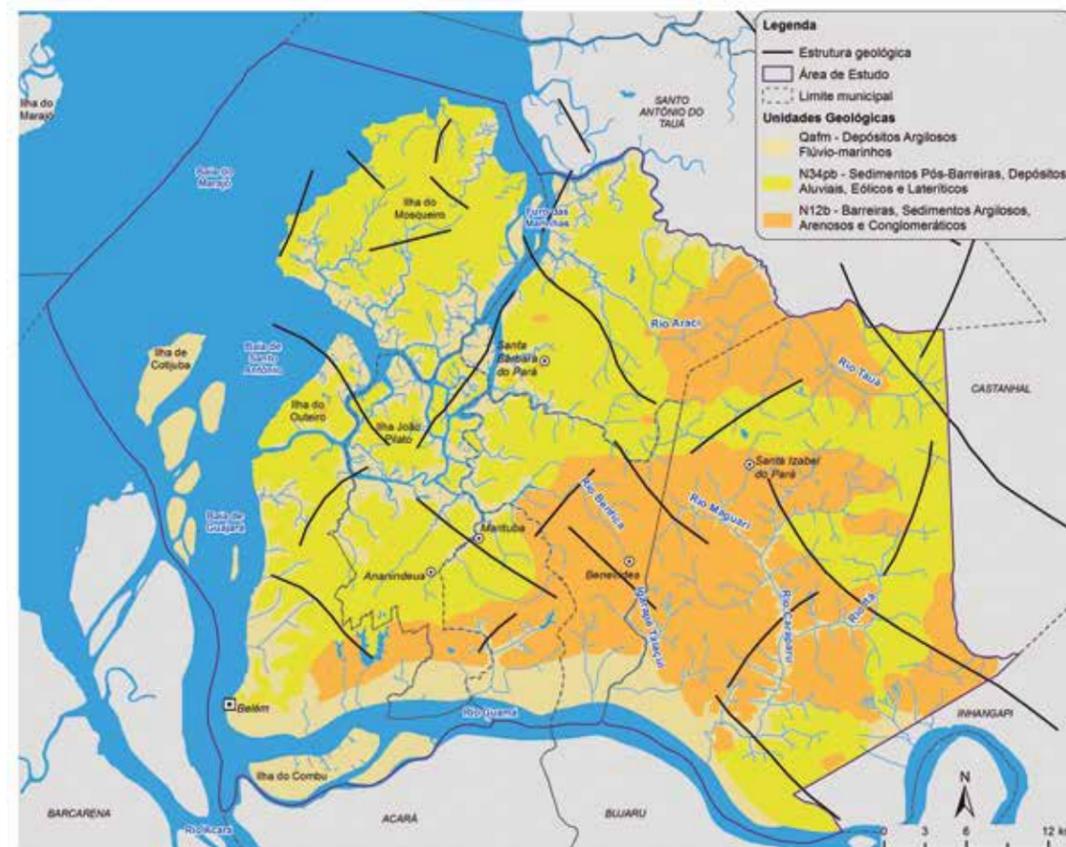
O maior ponto com acúmulo de vazões se dá na foz da Bacia do Rio Caraparu, maior bacia definida na área de estudo, com 426,39 km². A Q₉₅ nessa bacia é de 2,39 m³/s e a vazão média de 7,37 m³/s.

Apesar das vazões dos rios dentro da RMB serem de pequenas dimensões, o limite sul da área é delimitado pelo Rio Guamá, de grandes dimensões. A estação 31645000 (captação d'água da COSANPA) informa uma área de drenagem de 49.400 km² a montante dela. Utilizando as vazões específicas da UHP-17, foram obtidas vazões médias Q_{med} = 853,63 m³/s e Q₉₅ = 276,15 m³/s.

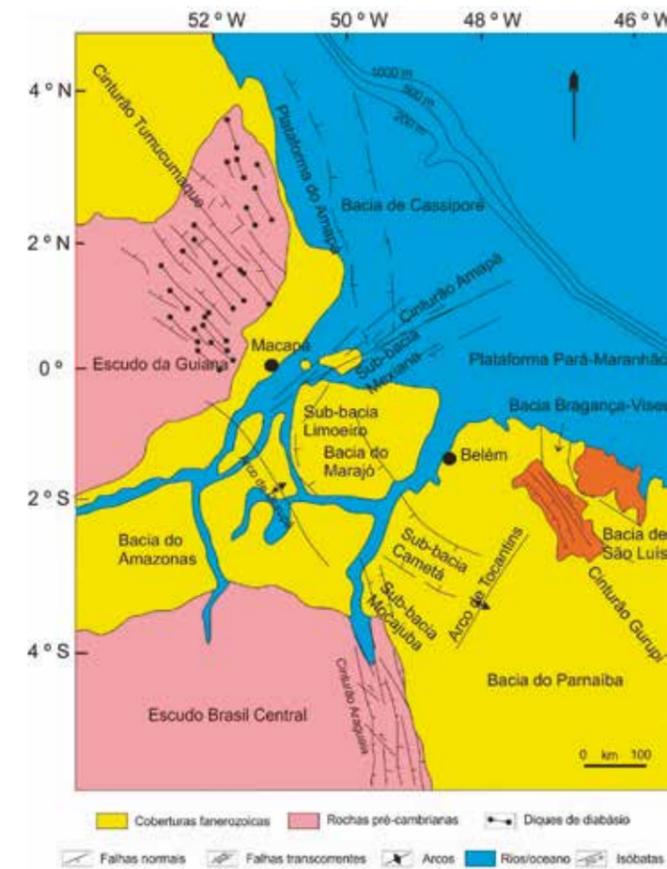
GEOLOGIA E TECTÔNICA

A geologia da região de Belém está representada por formações rochosas da Era Cenozoica denominadas Pirabas (Neo-Oligoceno/Eomioceno), Barreiras (Meso a Neomioceno) e coberturas sedimentares inconsolidadas designadas Pós-Barreiras, acumuladas no Plio-Pleistoceno. Na área afloram apenas as formações barreiras e pós barreiras, e a formação pirabas ocorre apenas em sub-superfície.

Mapa Geológico da Região de Belém.



Em sua maioria representam uma variedade rochosa de composição carbonática a siliciclásticas formadas em ambiente variando entre marinho transicional a plataformar, depositadas no contexto estrutural da Plataforma Bragantina.



Arcabouço tectônico da porção norte do Brasil interpretado com base em dados gravimétricos, magnéticos e sísmicos (COSTA et al., 2002).

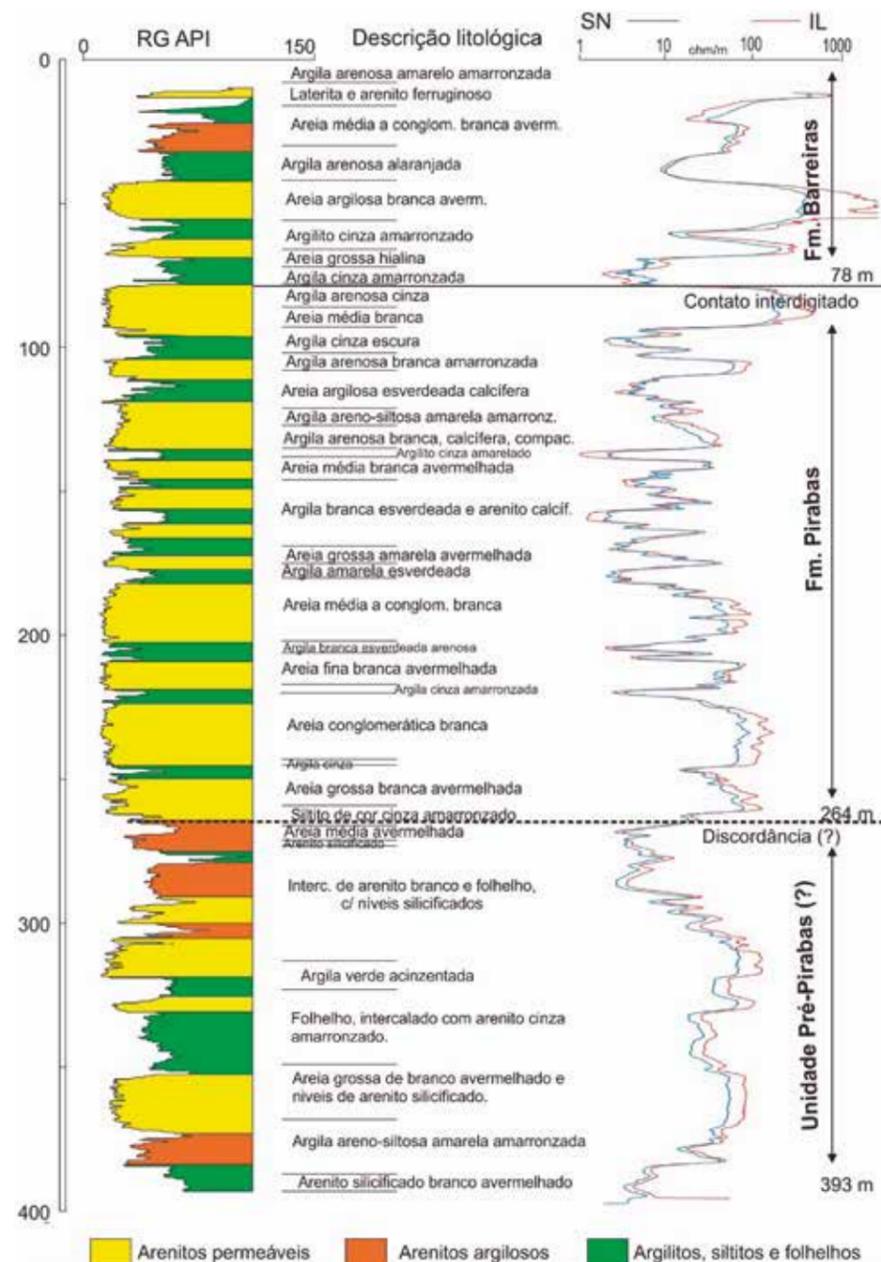
A **Formação Pirabas**, mais antiga da sucessão cenozoica compreende uma sequência de rochas de composição carbonática com intercalações secundárias de folhelhos negros a esverdeados e arenitos amarelados (PETRI, 1957; FERREIRA, 1966). Essa unidade ocorre somente em subsuperfície na área estudada, recoberta pela Formação Barreiras. No estado do Pará, essas rochas afloram na região litorânea do Nordeste do estado, nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas, de onde derivou a sua denominação. Seu rico e variado conteúdo fossilífero sugere presença de três fácies ecológicas denominadas Castelo, Capanema e Baunilha Grande, associadas, respectivamente a ambientes de mar aberto, laguna e mangue (FERREIRA, 1966; 1980; 1982; FERREIRA & CASSAB, 1985; FERREIRA & FRANCISCO, 1988).

A **Formação Barreiras** é caracterizada por depósitos de sedimentos siliciclásticos de cores variegadas (SÁ, 1969). Aflora nas porções sudoeste, sudeste e norte da área de estudo e mostra-se associada a crostas lateríticas ferruginosas. Os sedimentos Pós-Barreiras correspondem aos depósitos mais recentes de latossolos amarelados e arenosos, finos a médios, em geral maciços, sobrepostos à Formação Barreiras (ROSSETI et al., 2013). Afloram nas porções nordeste, centro e noroeste da área e incluem depósitos pleistocênicos de paleocanais fluviais, eólicos e praias; e depósitos holocênicos representados por aluviões, colúvios e elúvios.

Análises indiretas mais detalhadas da subsuperfície, a partir da utilização de perfisagens geofísicas de poços profundos permitiram individualizar:

- **Unidade basal (Pré-Pirabas):** Representa o substrato dos depósitos rochosos cenozoicos, possivelmente, associada à Formação Itapecuru, correspondendo, conforme entendimento de Costa (2002), a superfície de discordância que marca o limite Cretáceo/Terciário;
- **Unidade intermediária (Formação Pirabas):** com predominância de sedimentos arenosos na sua metade inferior e intensificação da frequência de camadas pelíticas na metade superior, características que justificam por parte de vários pesquisadores a subdivisão informal em Pirabas Superior e Pirabas Inferior, respectivamente, para diferenciar as duas sucessões;
- **Unidade superior (Barreiras e Pós Barreiras):** composta por sucessão com intercalações de camadas arenosas e de camadas pelíticas em proporções variáveis, representada pela Formação Barreiras. O contato superior da Formação Barreiras com os sedimentos Pós-Barreiras não foi possível de discernir nas perfisagens geofísicas.

Interpretação litológica e litoestratigráfica de perfilagem calibrada (padrão API - American Petroleum Institute) AN-56 do poço SIAGAS nº 1500001101 (Ananindeua).



Não obstante os estudos enfocando a neotectônica na região (IGREJA *et al.* 1990 e PALHETA 2008) apontarem a existência de zonas de falhas normais (NE) e transcorrentes (NW), o comportamento estratigráfico-estrutural da região, a partir das perfilagens geofísicas, não corrobora a interpretação de intensa estruturação em blocos "altos e baixos".

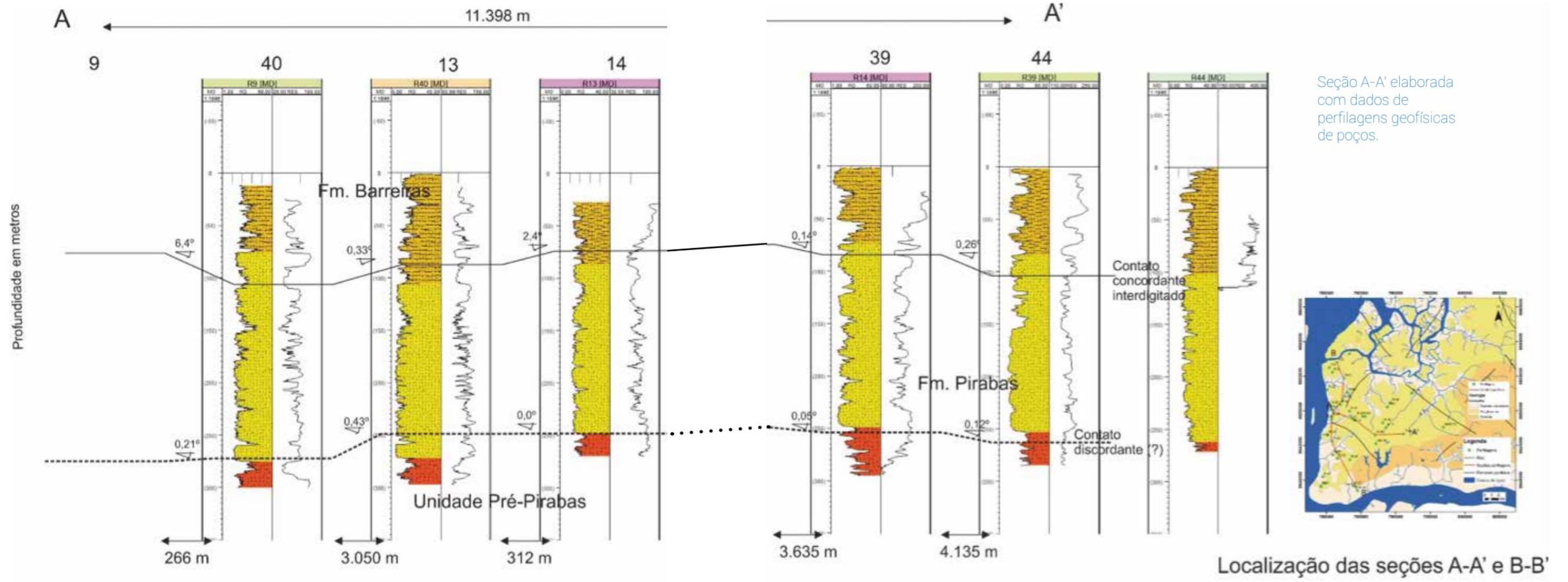
Embora os levantamentos geológicos realizados no âmbito do projeto, na área estudada, terem registrado a presença de lineamentos estruturais em sedimentos da Formação Barreiras, a análise das perfilagens geofísicas demonstra que os processos tectônicos na Plataforma Bragantina foram manifestadamente brandos, na porção estudada.

O comportamento estratigráfico-estrutural das unidades litoestratigráficas, em subsuperfície, pode ser observado nas seções A-A', orientada aproximadamente E-W; e B-B', orientada aproximadamente N-S, elaboradas com perfilagens geofísicas. Essas seções têm como *datum* a superfície do terreno, uma vez que as diferenças de altitude dos poços perfilados são pequenas. Prestam-se, portanto, para reconhecimento de movimentações tectônicas de amplitude regional, na área estudada.

As duas seções mostram que o substrato da sucessão terciária nesta porção da bacia na Plataforma Bragantina, representado pela unidade designada Pré-Pirabas, tem comportamento relativamente nivelado, sem irregularidades acentuadas, com desníveis máximos de até 1° entre perfis contíguos.

A espessura da sucessão terciária mostra certa regularidade, como observado nas referidas seções, variando entre a mínima de 226 m e a máxima 275 m nos perfis geofísicos. A característica dessa sucessão sedimentar é a recorrência de fácies arenosas e argilosas, com predomínio ora de uma, ora de outra, principalmente no intervalo compreendido pela Formação Barreiras e porção superior da Formação Pirabas.

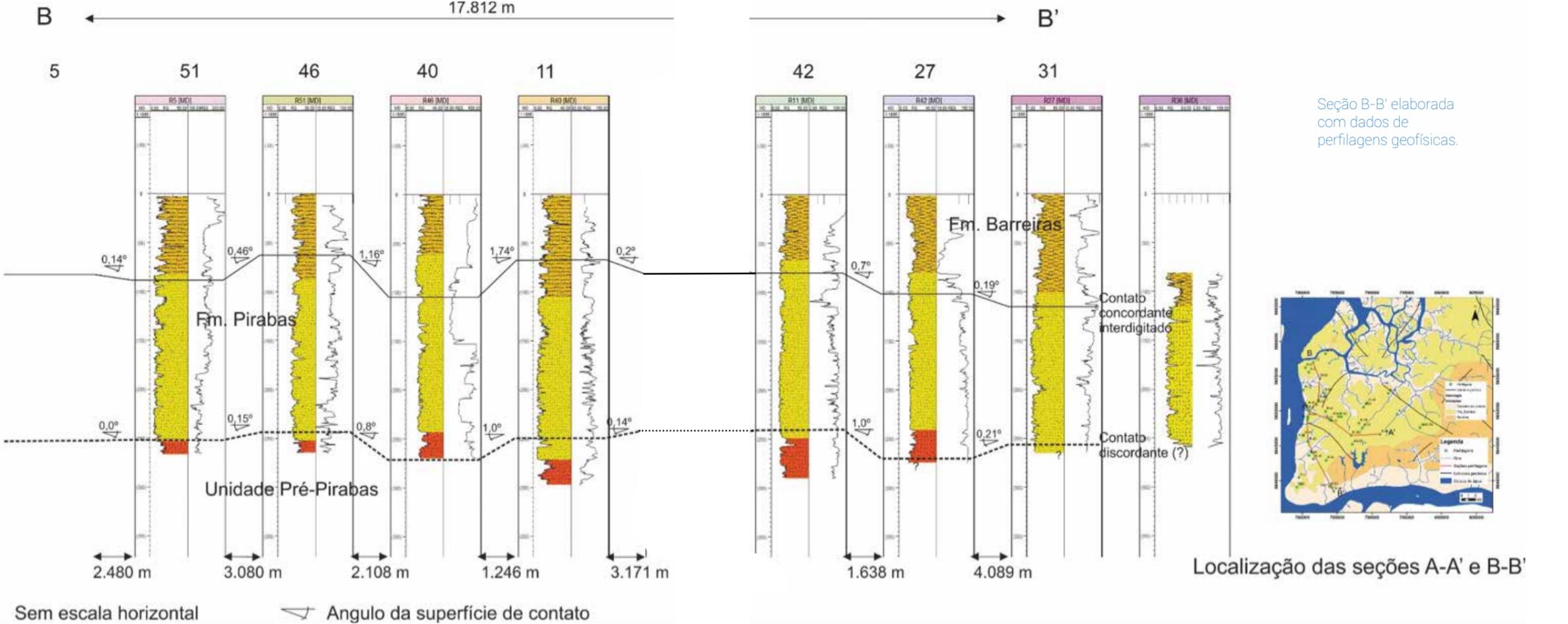




Seção A-A' elaborada com dados de perfis geofísicos de poços.



Localização das seções A-A' e B-B'



Seção B-B' elaborada com dados de perfis geofísicos.



Localização das seções A-A' e B-B'

GEOMORFOLOGIA E SOLOS

As principais unidades morfoestruturais resultante dos processos geomorfológicos das paisagens encontradas na região metropolitana de Belém são constituídas pelo Planalto Rebaixado da Amazônia e pela Planície Amazônica (Cortez et al. 2000).

O Planalto Rebaixado da Amazônia apresenta um relevo com extensas superfícies planas, suavemente onduladas e dissecadas, tendo se desenvolvido em rochas do Grupo Barreiras e do Pós-Barreiras. Os sistemas de colinas, no Planalto Rebaixado da Amazônia, funcionam como interflúvios, destacando-se como principal o divisor entre as drenagens da bacia do Rio Guamá e das bacias dos Furos Maguari e das Marinhas.

A Planície Amazônica situa-se acompanhando as margens do rio Guamá, do Furo Maguari, do Furo das Marinhas e dos baixos cursos de seus afluentes. É caracterizada por uma área plana, formada por depósitos aluviais Quaternários, com áreas alagadas e inundáveis periodicamente pelas chuvas e pelas marés.

Essas vastas terras baixas encontram-se usualmente acima das cotas das cheias fluviais. Em termos descritivos, segundo os mesmos autores, encontram-se na área estudada duas unidades geomorfológicas: Ilha de Marajó e Golfão Marajoara e Tabuleiros da Zona Bragantina.

Ilha de Marajó e Golfão Marajoara

Destaca-se um vasto domínio de terras baixas e inundáveis pontilhadas por formações de lagos de distintas dimensões. Tratam-se de terrenos argilosos e ricos em matéria orgânica, com predomínio de Gleissolos e Neossolos Fúlvicos eutróficos ou distróficos e Plintossolos Háplicos distróficos. Subordinadamente, ocorrem Latossolos Amarelos distróficos, Neossolos Quartzarênicos, Gleissolos Sálcos e Solos de Mangue.

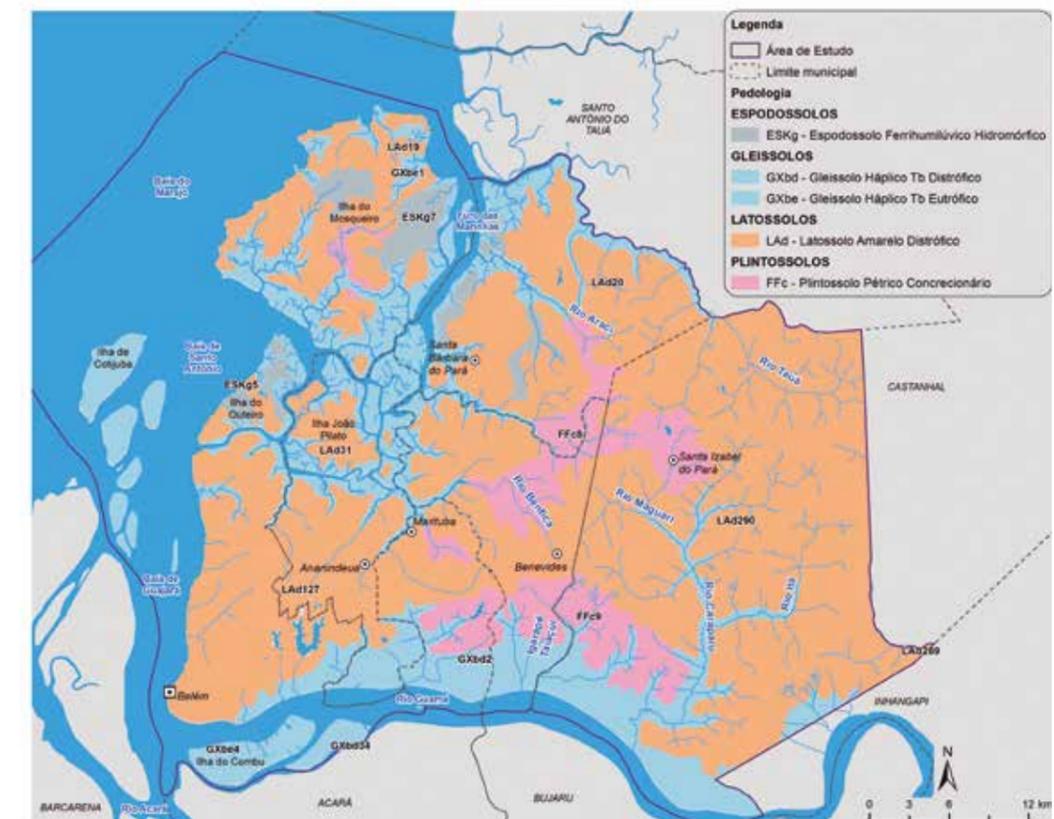
Tabuleiros da Zona Bragantina

Exclusivamente representada por extensos tabuleiros de baixa amplitude de relevo (invariavelmente inferiores a 30 m) e cuja dissecção exibe formas de relevo arredondadas que se assemelham a colinas amplas e suaves. Nas áreas mais próximas ao litoral esses tabuleiros estão embasados em rochas sedimentares do Grupo Barreiras e do Pós-Barreiras, frequentemente recobertas por coberturas detrito-lateríticas.

Sobre esses terrenos desenvolve-se, originalmente, a Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. Ocorrem solos bem drenados e de baixa fertilidade natural, espessos e lixiviados (Mata de Terra Firme), predominando Latossolos Amarelos distróficos. Subordinadamente se observam Plintossolos Háplicos distróficos, Plintossolos Pétricos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos. Nos amplos fundos de vales dos rios principais, predominam, nos baixos cursos, Gleissolos Háplicos distróficos e eutróficos e, nos médios cursos, Neossolos Flúvicos eutróficos.



Mapa de Geomorfologia

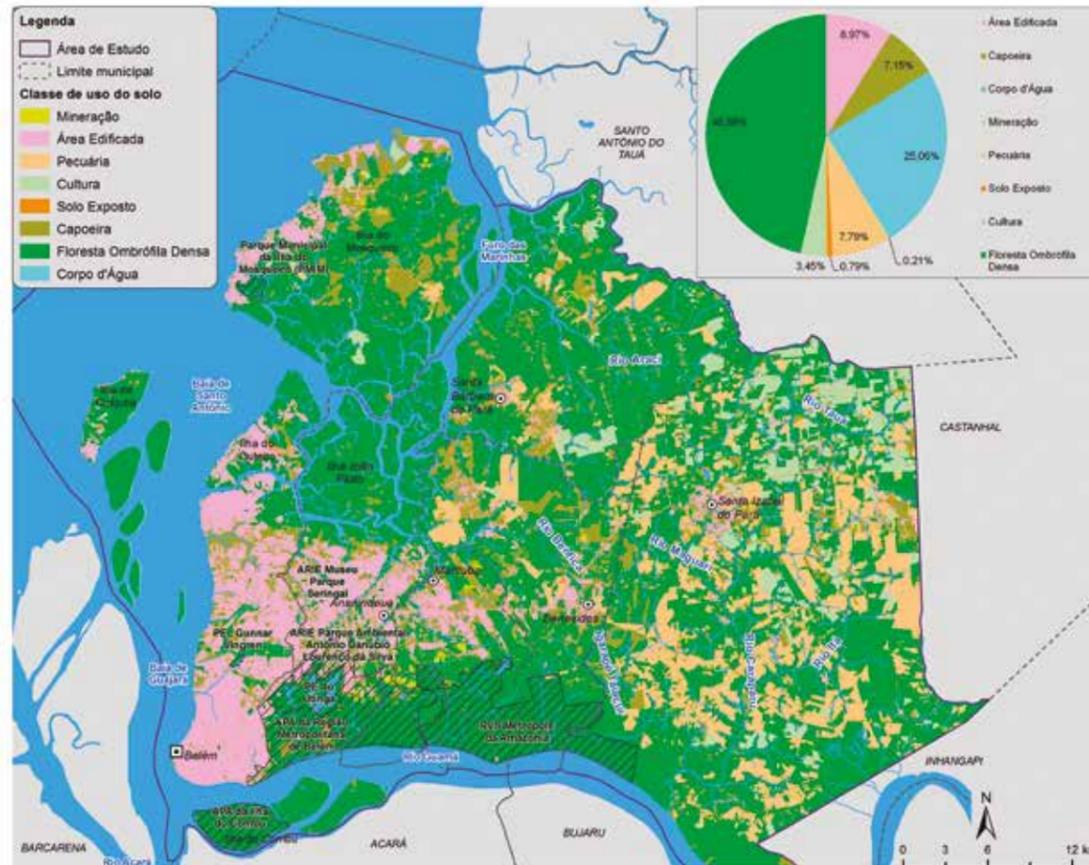


Mapa de Pedologia

USOS DA TERRA

A análise de classes de uso e cobertura do solo utilizou imagens **RapidEye** que possuem alta resolução espacial (5 m, reamostrada) e radiométrica (12 bits), adquiridas nos anos de 2012 e 2013. Dentre as classes de uso e cobertura de solo identificadas a maior proporção (cerca de 71%) da área total é ocupada pela floresta e corpos d'água.

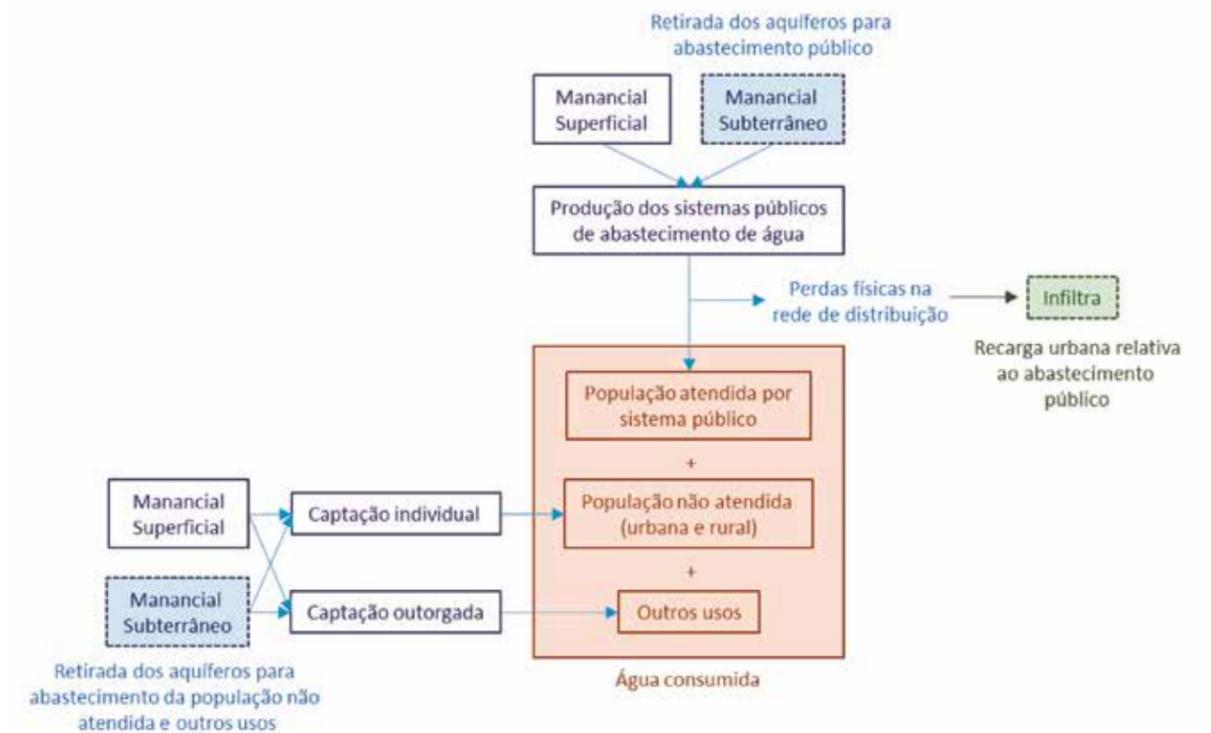
Mapa de Uso do Solo e proporção das classes de uso do solo na área de estudo.



IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O desenvolvimento deste item traz dois números importantes para a estimativa do balanço hidrogeológico: a demanda de água, que permite calcular o volume de água explorada dos mananciais subterrâneos; e as perdas dos sistemas públicos na distribuição de água, que representam um volume de água que é recarregado diretamente para os aquíferos livres. Esses componentes são fundamentais para compor o balanço hidrogeológico que inclui as variáveis derivadas da urbanização.

O esquema mostra o método utilizado na avaliação desses componentes.



A demanda de água representa uma variável de saída do balanço, enquanto que os vazamentos variáveis artificiais de entrada do balanço hidrogeológico.

As fugas de água das redes de abastecimento contribuem com a recarga do aquífero, assim como os vazamentos das redes de esgoto e a infiltração das fossas e sumidouros (ANA, 2012).

Os impactos nos aquíferos causados por vazamentos de água tratada da rede de abastecimento público, vazamentos da rede coletora de esgotos e despejo de efluentes *in natura em fossas e sumidouros são bastante distintos*.

A água que se infiltra nos aquíferos em decorrência de vazamentos na rede de distribuição têm características hidroquímicas diferentes daquelas encontradas em condições naturais nos aquíferos. As interações dessas águas modificam o ambiente hidroquímico natural e podem provocar dissolução ou precipitação de minerais.

Já os vazamentos da rede de esgoto ocorrem em pequena quantidade, porém, a qualidade da água que pode se infiltrar no aquífero é ruim. Os esgotos sanitários são constituídos por matérias orgânicas e inorgânicas nas formas dissolvida, coloidal e suspensão. Foster & Hirata (1993) ressaltam que o principal contaminante da água subterrânea na zona urbana é proveniente do saneamento sem rede de coleta de esgoto, como fossas e sumidouros. Segundo os autores, boro, cloretos, hidrocarbonetos, compostos nitrogenados e sulfatos são os principais contaminantes provenientes do efluente sanitário.

Não se pode desprezar, na qualidade da água da recarga urbana, as águas de precipitações atmosféricas que atingem regiões antropizadas e infiltram nos aquíferos rasos. Essas águas, derivadas da drenagem urbana, podem carrear poluentes industriais dispersos no ar e "lavar" superfícies contaminadas por

diferentes componentes orgânicos e metais, como por exemplo, aterros sanitários, lixões, valas de lixo doméstico e lixo acumulado nas ruas, postos de combustíveis, cemitérios, etc. Ainda que a maior parte dessa água residual urbana seja descarregada para as drenagens, uma parcela pode infiltrar nos aquíferos rasos.

A despeito da ação atenuadora na retenção de elementos contaminantes que se infiltram no solo carregados pela água, a recarga derivada dos esgotos sanitários e industriais é potencialmente prejudicial à qualidade natural da água subterrânea. Do ponto de vista prático, a percolação de águas residuais deve ser vista como um processo de contaminação do aquífero em desenvolvimento.

Abastecimento de água

Os serviços de abastecimento público de água tem um baixo índice de cobertura nos municípios da área de estudo, com exceção de Belém. Assim, revela-se um cenário com o qual mais da metade da população de Ananindeua, Benevides e Marituba, utiliza soluções alternativas de abastecimento. A estimativa da população atendida e não atendida por sistema público foi realizada a partir dos indicadores do SNIS (2011, 2012, 2015) e da COSANPA (2018).

População atendida e não atendida por sistema público de abastecimento

Município	População total (hab)	Índice de atendimento total (%) ¹	População atendida (hab)	População urbana não atendida (hab)	População rural não atendida (hab)
Ananindeua	516.057	33,3	171.847	343.363	847
Belém	1.452.275	90,1	1.308.500	142.545	1.230
Benevides	60.990	47,7	29.097	17.852	14.041
Marituba	127.858	22,2	28.384	98.442	1.032
Santa Bárbara do Pará	20.492	60,1	12.309	2.606	5.577
Santa Izabel do Pará	68.836	62,1	42.727	18.879	7.230
Total	2.246.508		1.592.864	623.687	29.957

Fonte: IBGE (2017); SNIS (2011, 2012, 2015) e COSANPA (2018).

Os principais mananciais superficiais dos sistemas públicos de abastecimento localizados na área de estudo são o rio Guamá, o lago Água Preta e o lago Bolonha. Os lagos Água Preta (10.000.000 m³) e Bolonha (2.000.000 m³) foram formados por meio da construção de barragens. Atualmente, segundo informações da COSANPA (2018), são captados 3,20 m³/s no rio Guamá para reforço dos lagos Água Preta e Bolonha.

Em Belém estima-se que sejam produzidos atualmente 5,63 m³/s de água tratada para abastecimento da população servida com rede. Dos 5,63 m³/s, 2,60 m³/s são provenientes do Complexo Bolonha (mananciais superficiais) e o restante (3,03 m³/s), portanto, é proveniente de mananciais subterrâneos.



Fonte: AMAE

Captação de água no rio Guamá para reforço dos lagos Água Preta e Bolonha.



Lago Água Preta.

Fonte: Portal ORM



Reservatório São Brás.

Lago Bolonha.

Em relação às captações subterrâneas, segundo dados de PMB (2014), em Belém a água é captada por meio de poços tubulares com capacidade que variam de 60 a 360 m³/h. A água subterrânea é explorada principalmente do Sistema Aquífero Pirabas em razão do maior volume de produção de água e do menor teor de ferro. Nos poços com captação na Formação Barreiras e Pós Barreiras, em profundidades da ordem de 70 metros, o elevado teor de ferro na água, em alguns casos, exige a construção de estações de tratamento de água de desferrização.

Sistema Isolado Mata Fome I, em Belém, composto por um poço profundo.



Fonte: PMB (2014).

Sistema Isolado Sideral, em Belém, composto por três poços profundos.



Fonte: COSANPA.

No total, estima-se que a produção atual de água para distribuição à população com acesso à rede pública seja em torno de 7,15 m³/s, sendo 2,90 m³/s (41%) proveniente de mananciais superficiais e 4,25 m³/s (59%) proveniente de mananciais subterrâneos. No caso das perdas físicas de água na rede de distribuição, que representa desperdício de recursos naturais, operacionais e de receita para o prestador de serviços, na maioria dos municípios da área de estudo, o índice é superior ao índice médio do Brasil (36,7%) e ao índice médio do Estado do Pará (39,7%) (SNIS, 2011, 2012, 2015; COSANPA, 2018).

Considerando o índice de perdas físicas de cada município tem-se que 3,02 m³/s de água são perdidos na distribuição antes de chegar às residências, água que deve retornar na forma de recarga aos aquíferos. Estima-se que a população sem acesso ao sistema público de abastecimento, demanda em torno de 1,48 m³/s, sendo 99% (1,46 m³/s) provenientes de mananciais subterrâneos e 1% (0,02 m³/s) provenientes de mananciais superficiais.

Estimativa da produção total e perdas na distribuição dos sistemas públicos de abastecimento de água

Município	Abastecimento Público				
	Produção Total (m ³ /s)	Superficial (m ³ /s)	Subterrâneo (m ³ /s)	Índice de perdas físicas (%)	Perdas (m ³ /s)
Ananindeua	1,05	0,30	0,75	48,90	0,51
Belém	5,63	2,60	3,03	40,80	2,30
Benevides	0,10	0,00	0,10	30,23	0,03
Marituba	0,12	0,00	0,12	48,70	0,06
Santa Bárbara do Pará	0,05	0,00	0,05	43,78	0,02
Santa Izabel do Pará	0,20	0,00	0,20	50,51	0,10
Total	7,15	2,90	4,25		3,02

Estima-se que a população sem acesso ao sistema público de abastecimento, demanda em torno de 1,48 m³/s, sendo 99% (1,46 m³/s) provenientes de mananciais subterrâneos e 1% (0,02 m³/s) provenientes de mananciais superficiais.

Estimativa da demanda total, superficial e subterrânea da população não atendida por sistema público de abastecimento de água

Município	Abastecimento Humano – População Não Atendida		
	Demanda (m ³ /s)	Superficial (m ³ /s)	Subterrâneo (m ³ /s)
Ananindeua	0,796	0,007	0,789
Belém	0,331	0,007	0,324
Benevides	0,058	0,001	0,056
Marituba	0,229	0,001	0,228
Santa Bárbara do Pará	0,012	0,001	0,011
Santa Izabel do Pará	0,052	0,003	0,049
Total	1,478	0,020	1,458

A demanda industrial e de outros usuários foi estimada a partir do cadastro de outorgas da SEMAS/PA.

Número de processos e vazão outorgada para o setor industrial

Município	Subterrânea		Superficial		Total (m ³ /s)
	Nº processos	Vazão outorgada (m ³ /s)	Nº processos	Vazão outorgada (m ³ /s)	
Ananindeua	64	0,046	0	0,000	0,046
Belém	125	0,345	1	0,006	0,351
Benevides	53	0,177	0	0,000	0,177
Marituba	22	0,012	0	0,000	0,012
Santa Bárbara do Pará	16	0,005	0	0,000	0,005
Santa Izabel do Pará	20	0,022	0	0,000	0,022
Total	300	0,607	1	0,006	0,613

Fonte: Cadastro de Outorgas (SEMAS/PA)

Número de processos e vazão outorgada para outros usuários

Município	Subterrânea		Superficial		Total (m³/s)
	Nº processos	Vazão outorgada (m³/s)	Nº processos	Vazão outorgada (m³/s)	
Ananindeua	135	0,070	0	0,000	0,070
Belém	260	0,213	9	0,008	0,222
Benevides	16	0,006	4	0,066	0,073
Marituba	27	0,079	0	0,000	0,079
Santa Bárbara do Pará	1	0,000	1	0,000	0,000
Santa Izabel do Pará	17	0,023	3	0,079	0,101
Total	456	0,392	17	0,153	0,545

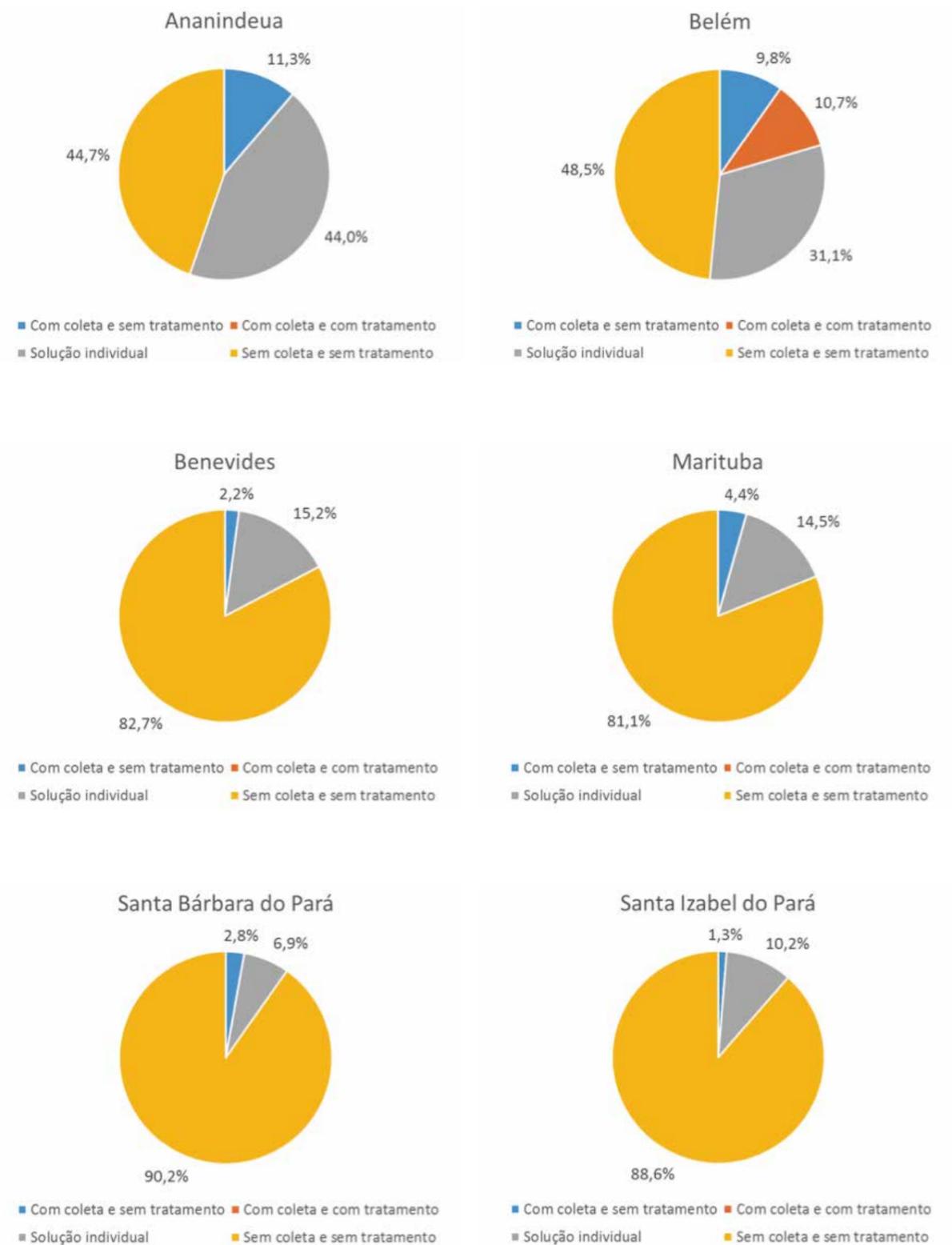
Fonte: Cadastro de Outorgas (SEMAS/PA)

Assim, percebe-se uma maior demanda de água subterrânea para a indústria nos municípios de Belém, Ananindeua e Benevides. No total, são captados na área de estudo 0,613 m³/s, sendo 0,607 m³/s (99,0%) provenientes de mananciais subterrâneos e 0,006 m³/s (1,0%) provenientes de mananciais superficiais. A maior parte da água para abastecimento industrial, portanto, é proveniente de manancial subterrâneo. Em relação ao demais usuários, no total, são captados 0,545 m³/s, sendo 0,392 m³/s (72%) provenientes de manancial subterrâneo e 0,153 m³/s (28%) provenientes de manancial superficial.

Esgotamento sanitário

No que se refere à rede de coleta de esgoto, os índices de coleta são extremamente baixos na área estudada, abaixo da média nacional (55,2%). Conforme o Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas ANA (2017), o município de Belém apresenta o maior índice de coleta (20,5%) na área estudada, seguido de Ananindeua (11,3%), os quais apresentam índices de coleta superiores ao índice do Estado do Pará (5,4%). Os demais municípios têm índices que variam do máximo de 4,4% (Marituba) ao mínimo de 1,3% (Santa Izabel do Pará).

Além de baixos, os volumes coletados de esgoto não são tratados, com exceção do município de Belém que trata pouco mais de 10% dos efluentes. A deficiência da coleta de esgotos propicia o uso de alternativas individuais, como fossas e sumidouros ou o lançamento do esgoto diretamente em cursos d'água ou no solo sem qualquer tipo de tratamento.



Destinação final dos esgotos domésticos nas áreas urbanas de Belém e municípios adjacentes. Fonte: ANA (2017).

Fonte: ANA (2017).

A falta de coleta e tratamento e a disposição dos efluentes domésticos em fossas e sumidouros realizada durante anos, concentradas em uma mesma região, representa um contínuo aporte de contaminantes aos aquíferos.

Esse cenário ocorre em uma região onde os aquíferos aflorantes tem o nível d'água rasos, facilitando o processo de contaminação.



Contaminação do solo e corpos hídricos devido à carência de saneamento básico em Belém e região

Diversos estudos conduzidos na Região Metropolitana de Belém apontam que as infiltrações dos efluentes domésticos através do sistema de saneamento in situ são potenciais fontes de contaminação do aquífero Barreiras (LIMA, 2000; GASPAR, 2001; ARAÚJO, 2001; CABRAL, 2004; CABRAL & LIMA, 2006). Os estudos apontam principalmente contaminação por compostos nitrogenados e cloreto.

Avalia-se, portanto, que o principal fator gerador dessa contaminação é o baixo nível de atendimento aos preceitos fundamentais do saneamento básico, principalmente relacionado ao esgotamento sanitário, com alguma contribuição da drenagem urbana.

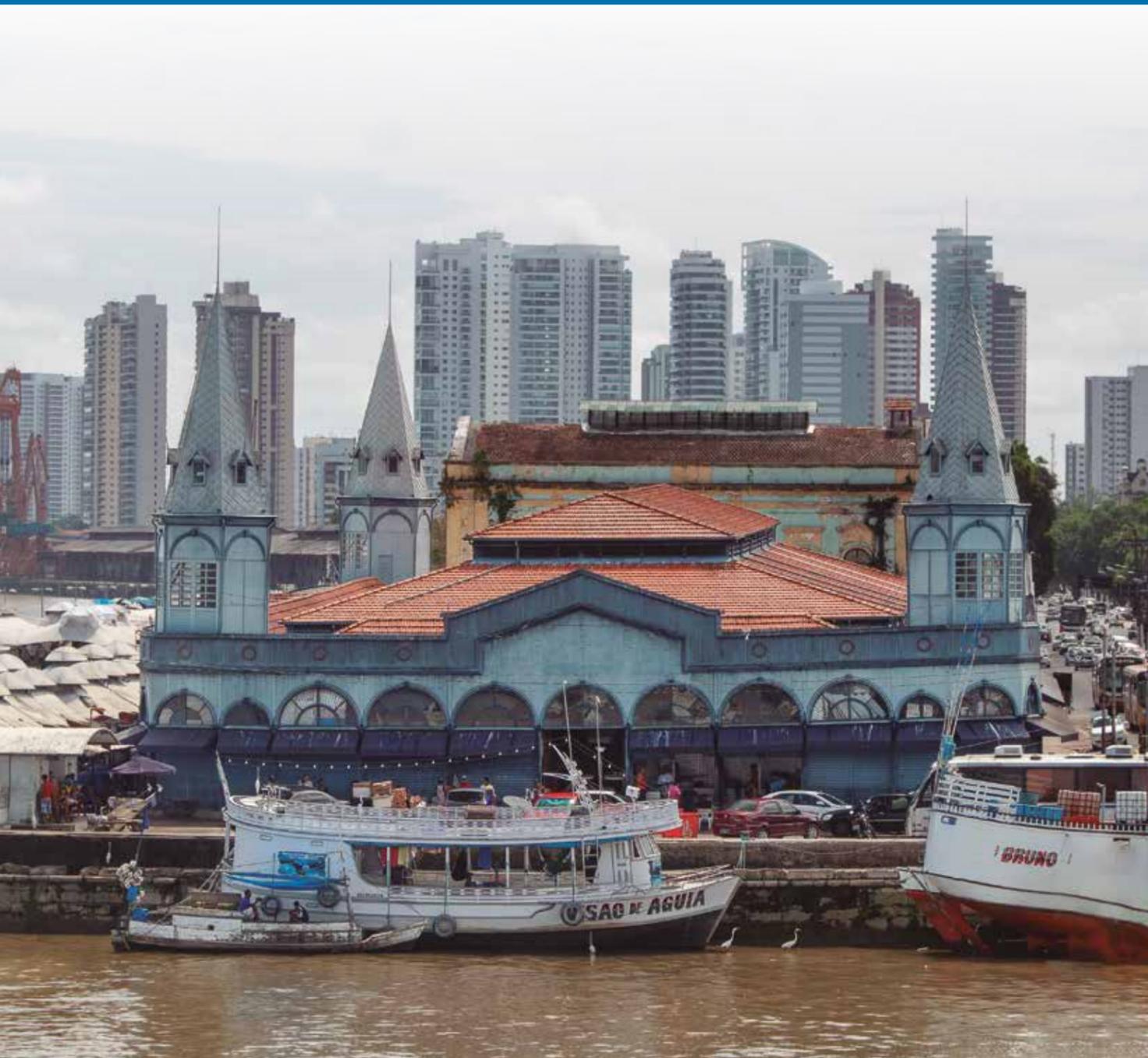
Produção e destinação final do esgoto doméstico de Belém e municípios adjacentes.

Município	Esgoto gerado (m³/s)	Esgoto coletado (m³/s)	Esgoto tratado em solução individual (m³/s)	Esgoto sem nenhum tipo de tratamento (m³/s)
Ananindeua	1,122	0,127	0,493	0,502
Belém	3,107	0,636	0,965	1,506
Benevides	0,153	0,003	0,023	0,127
Marituba	0,296	0,013	0,043	0,240
Santa Bárbara do Pará	0,031	0,001	0,002	0,028
Santa Izabel do Pará	0,199	0,003	0,020	0,176
Total Geral	4,909	0,782	1,547	2,580

A partir dos índices de coleta e tratamento disponíveis no Atlas Esgoto (ANA, 2017), estima-se que na região de Belém e municípios adjacentes, apenas 15,9% do esgoto gerado é coletado (0,78 m³/s), 52,6% dos esgotos não recebem nenhum tipo de tratamento (2,58 m³/s), enquanto 31,5% recebem tratamento por meio de solução individual (1,54 m³/s). Os efluentes industriais não foram considerados, uma vez que não existem dados nos cadastros dos órgãos ambientais.

A recarga dos aquíferos relativa ao esgotamento sanitário foi estimada considerando-se a parcela de esgoto perdida através de vazamentos nas redes coletoras e a parcela de esgoto que infiltra através das fossas e sumidouros. No presente estudo, adotou-se um índice de vazamento médio de 10% na rede de coleta de esgoto. Em relação ao volume infiltrado a partir das fossas e sumidouros, admitiu-se que 80% do esgoto destinado às soluções individuais acaba infiltrando e retornando aos aquíferos.

Todo volume de água recarregado ao aquífero é importante para a manutenção dos níveis e da potencialidade. No entanto, a parcela da recarga urbana proveniente do esgotamento sanitário é altamente indesejável para o aquífero por se tratar de um volume de água contaminada e que representa uma forte ameaça à qualidade das águas subterrâneas nas zonas urbanas (ANA, 2012).



Estimativa da recarga urbana relativa ao esgotamento sanitário de Belém e municípios adjacentes.

Município	Infiltração - Fossas e Sumidouros (m ³ /s)	Infiltração - Rede de Esgoto (m ³ /s)	Recarga Urbana - Esgotamento (m ³ /s)
(m ³ /s)			
Ananindeua	0,395	0,013	0,407
Belém	0,772	0,064	0,836
Benevides	0,019	0,000	0,019
Marituba	0,034	0,001	0,036
Santa Bárbara do Pará	0,002	0,000	0,002
Santa Izabel do Pará	0,016	0,000	0,016
Total Geral	1,238	0,078	1,316

A infiltração potencial no solo por efluentes, principalmente domésticos, originados de vazamentos na rede coletora de esgotos e despejos em fossas e sumidouros foi estimada para o município de Belém e municípios adjacentes em 1,32 m³/s, ou seja, dos 4,91 m³/s de esgoto gerado (estimado por este estudo), 26,8% infiltram no solo, contribuindo para a recarga e potencial contaminação do aquífero Barreiras.

O município de Belém registra o maior valor de recarga potencial por esgotamento sanitário (0,84 m³/s) em razão da maior população do município, seguido do município de Ananindeua (0,41 m³/s). Os demais municípios de área estudada somam apenas 0,08 m³/s





LEVANTAMENTO

DE CAMPO

CADASTRO DE PONTOS D'ÁGUA

O método de levantamento de dados de pontos d'água no âmbito deste estudo consistiu da consulta a bancos de dados secundários, seguida de cadastramento de poços e cacimbas inéditos, *in loco*.

Consultou-se os bancos de dados de instituições competentes no âmbito da fiscalização, regulamentação e cadastramento de poços, entre as quais se destacam CPRM, DNPM, SEMAS, COSANPA e prefeituras pertencentes à área de estudo, para checagem dos poços e nascentes que já constavam como cadastrados por esses órgãos.

Cadastramento *in loco*

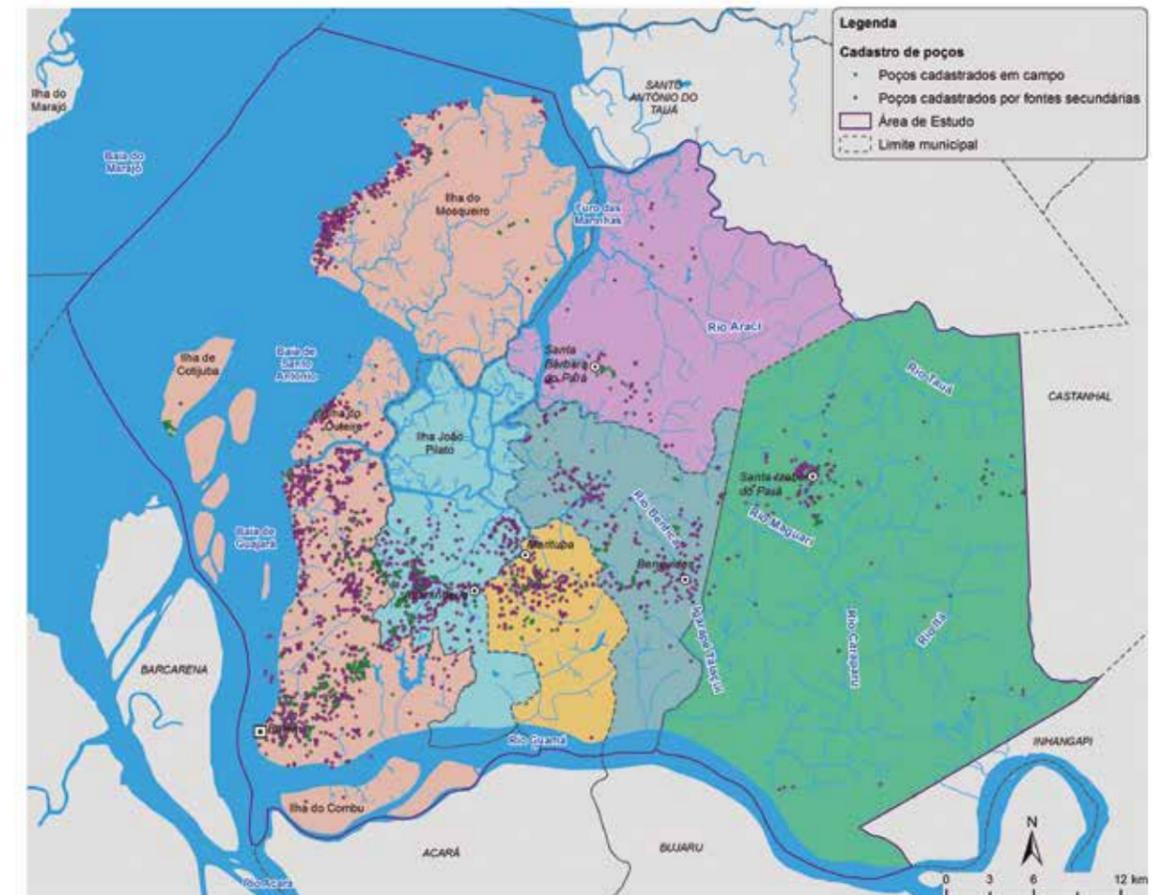
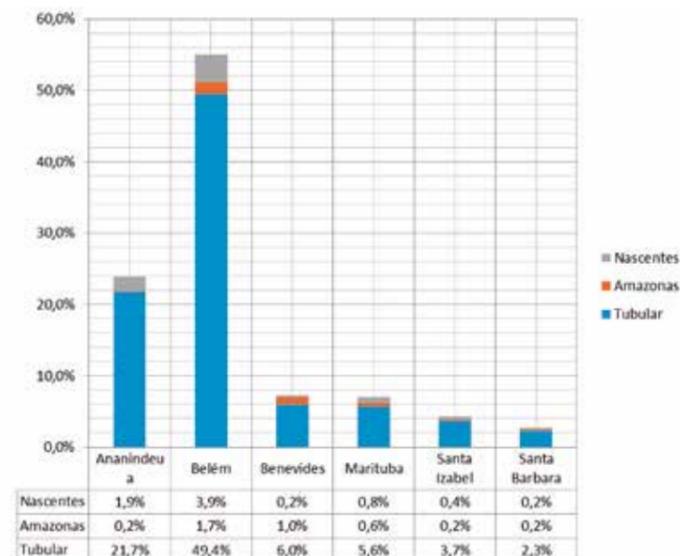


A etapa de cadastramento *in loco* consistiu na realização de trabalhos de campo, com o objetivo de proceder com o cadastramento nos locais onde existem poços e nascentes, como condomínios residenciais, indústrias, comércios, clubes, balneários, unidades de conservação, dentre outros.

O cadastramento foi efetuado mediante o geoposicionamento, registro fotográfico e o preenchimento de ficha cadastral com informações como dados gerais, dados de exploração, dados de perfuração, dados de aquíferos, dados de teste de vazão e dados de amostras de água. Para nascentes, a ficha cadastral contém as seguintes informações: dados gerais, bacia hidrográfica, tipo de nascente, fisiografia, perenidade, preservação, solo, vegetação, cobertura vegetal e uso das águas.

Um total de 458 poços tubulares, 20 poços escavados e 38 nascentes foi cadastrado, resultando em 516 pontos novos de água registrados, de um total de 3.434 poços compilados.

Percentual e tipo de ponto d'água cadastrado por cada cidade da área de estudo.



Mapa geral de pontos d'água

FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO

O cadastramento de fontes potenciais de contaminação iniciou com a pesquisa de dados secundários. O mapeamento de empreendimentos por imagens de satélite foi iniciado, seguido das vistorias de campo a fim de se identificar possíveis fontes que não tivessem sido apontadas pela pesquisa indireta. Observou-se uma escassez na disponibilidade dessas informações por parte dos órgãos oficiais.

Foram visitados 53 pontos de diferentes atividades, onde as fontes potenciais de contaminação consideradas foram:

- Sistemas de saneamento;
- Atividades industriais;
- Postos de combustíveis;
- Oficinas mecânicas;
- Lava-jatos;
- Hospitais;
- Cemitérios;
- Resíduos Sólidos;
- Lagoas de Estabilização;

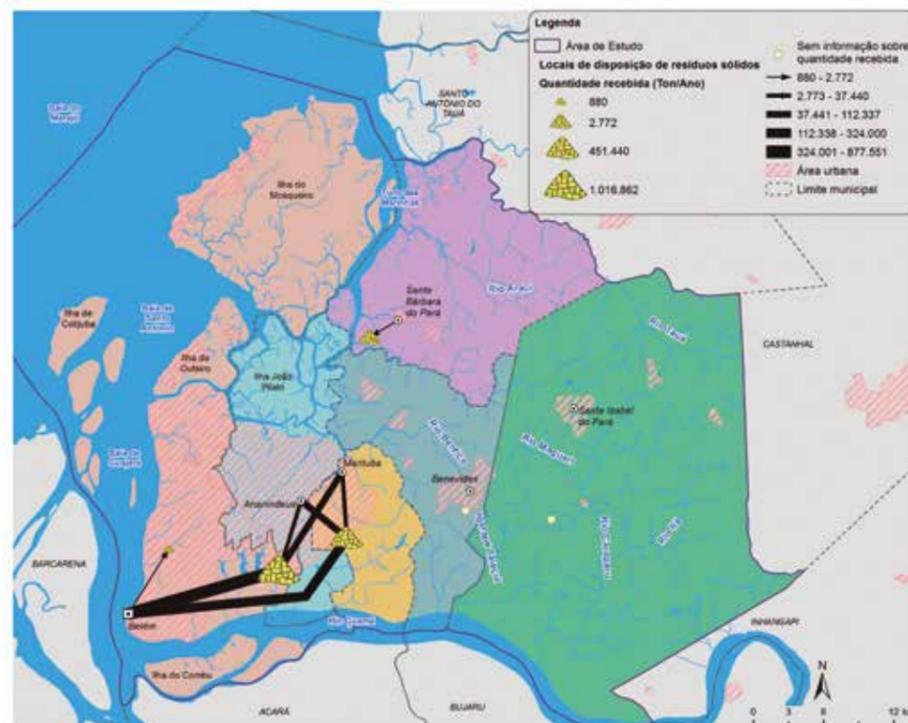
Áreas rurais (rebanhos, matadouros, criação de animais, uso de fertilizantes/agroquímicos, áreas agrícolas, entre outros).

Essas atividades consideradas como potencialmente contaminantes foram divididas em dois grandes grupos, considerando a distribuição espacial e a maneira como podem provocar as contaminações às águas subterrâneas, em fontes pontuais (1.584 empreendimentos cadastrados) e fontes difusas de contaminação (não tabeladas por falta de dados precisos de localização e áreas de abrangência).

Mapa de potencial de contaminação – Indústrias



Mapa de potencial de contaminação – Deposição de resíduos sólidos

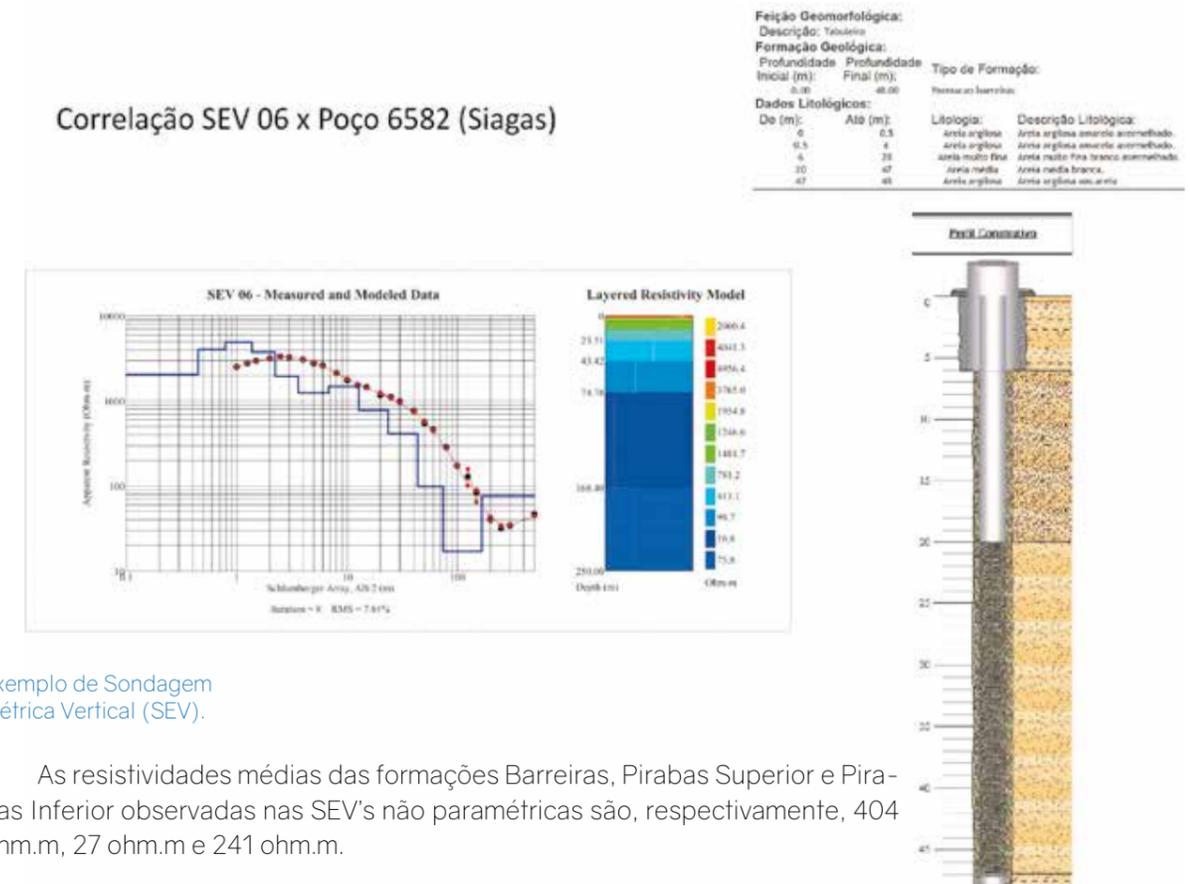


INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

As investigações geofísicas consistiram na avaliação das propriedades físicas do subsolo de forma indireta. Os serviços desenvolvidos objetivaram determinar a distribuição espacial, espessura, litofácies e profundidade do nível d'água dos sistemas aquíferos correspondentes ao arcabouço hidrogeológico da área de estudo, a partir da utilização da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

Utilizou-se dados existentes na literatura e outros levantamentos realizados no âmbito de outros projetos na área, resultando em quarenta (40) sondagens elétricas verticais executadas neste projeto, informações de vinte e cinco (25) sondagens elétricas verticais, de quarenta e um (41) poços com perfilagens geofísicas e quarenta e quatro (44) poços tubulares profundos, os quais puderam ser utilizados para correlação com os dados obtidos durante os levantamentos.

Correlação SEV 06 x Poço 6582 (Siagas)



Exemplo de Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

As resistividades médias das formações Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior observadas nas SEV's não paramétricas são, respectivamente, 404 ohm.m, 27 ohm.m e 241 ohm.m.

Realização de Sondagem Elétrica Vertical (SEV).



Valores de resistividade mínima, máxima, média e desvio padrão para cada unidade aquífera.

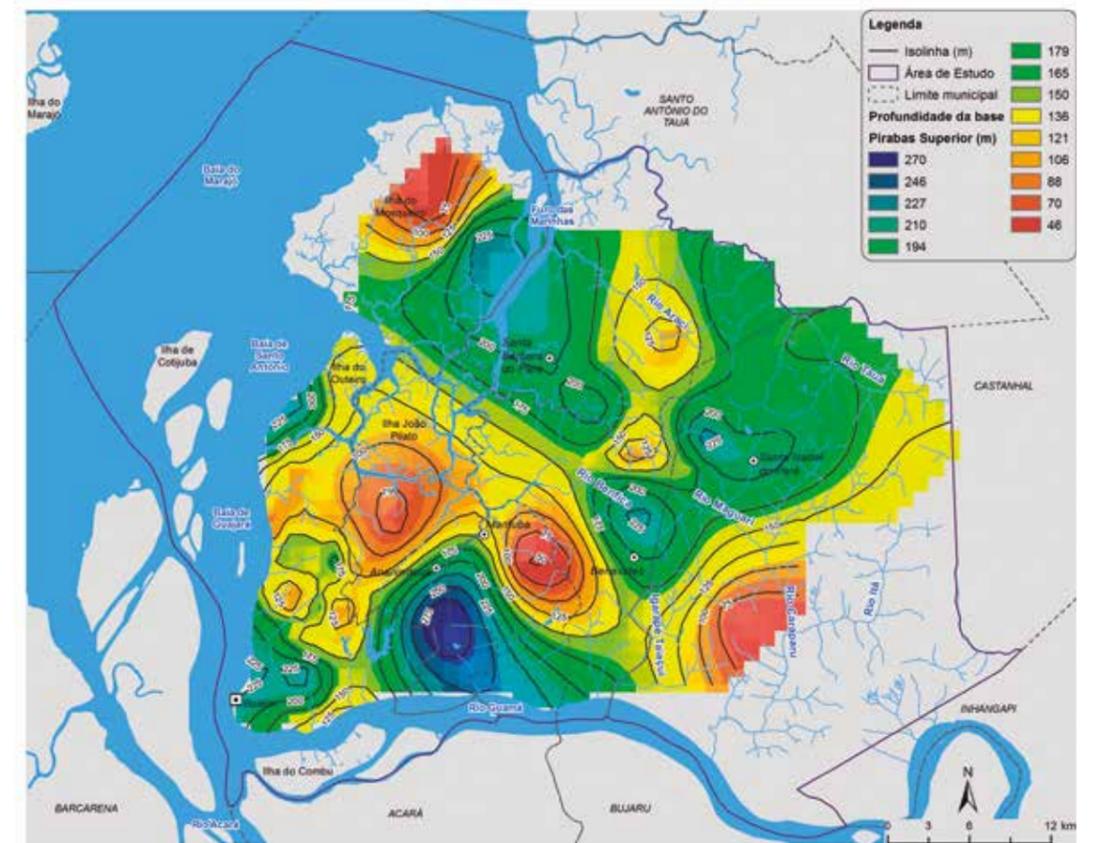
Unidade Aquífera	Resistividade Mínima	Resistividade Máxima	Resistividade Média	Desvio Padrão
Barreiras	30	1.000	404	263
Pirabas Superior	6	85	27	20
Pirabas Inferior	26	2.800	241	545

O resultado da modelagem permitiu identificar e estimar a profundidade do nível freático no local de cada SEV. A resistividade média observada nas quarenta (40) SEV's para a zona saturada, ou seja, abaixo do nível freático, foi de 700 ohm.m.

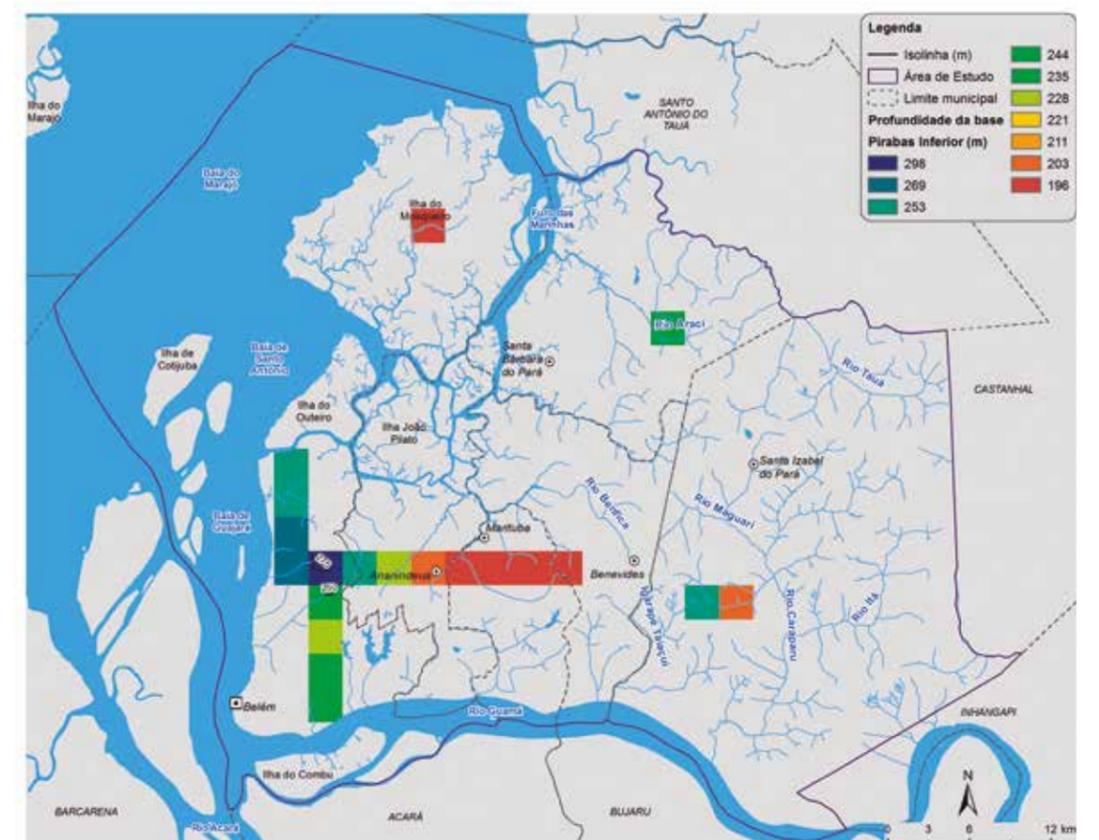
Dados gravimétricos obtidos junto à CPRM (OLIVEIRA & SILVA, 2011) e de SEVs pré-existent (MENDES, 2000) foram reprocessadas para auxiliar na interpretação, de forma que enriqueceram o conhecimento.

Como resultados principais obteve-se as espessuras das rochas da formação Barreiras e Pirabas Superior e procedeu-se uma integração dos dados geológicos com os geofísicos.

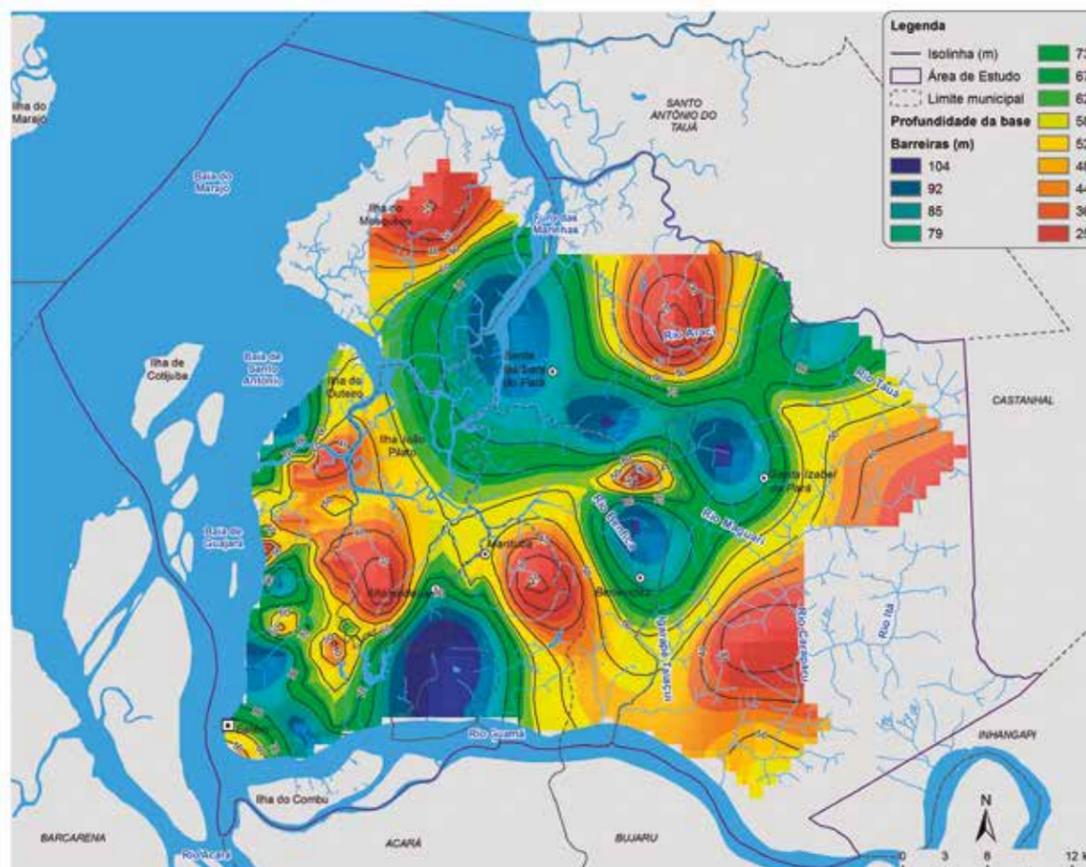
Mapa de Profundidade da Base (isópacas) do Barreiras



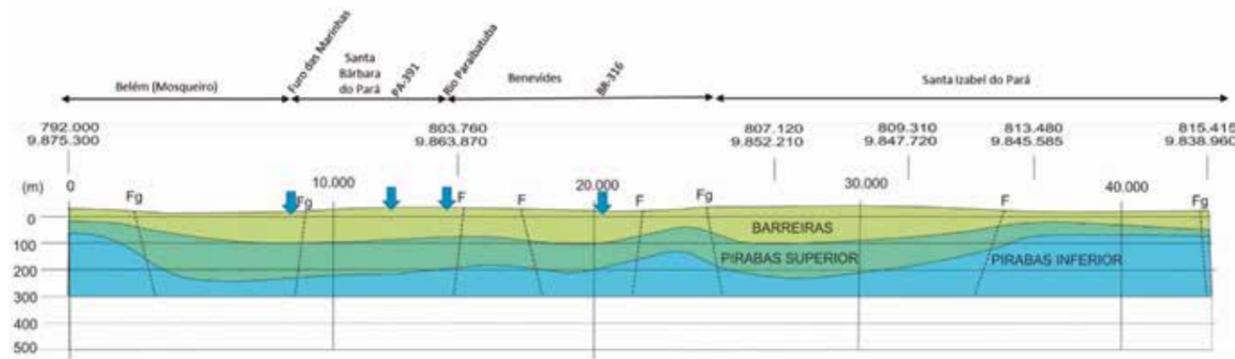
Mapa de Isópacas do Pirabas Superior



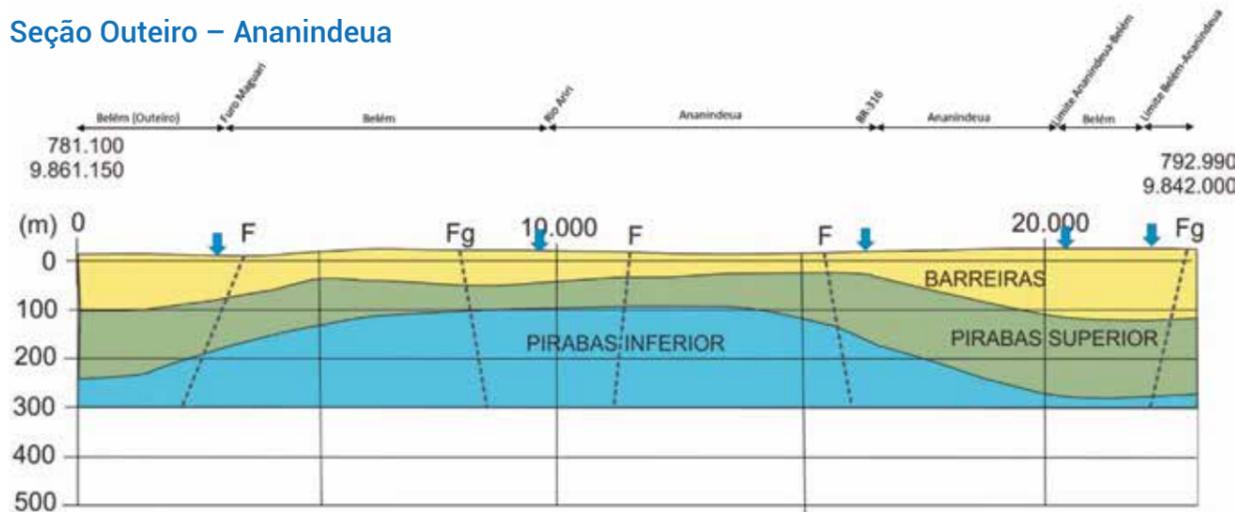
Mapa de Isópacas do Pirabas Inferior



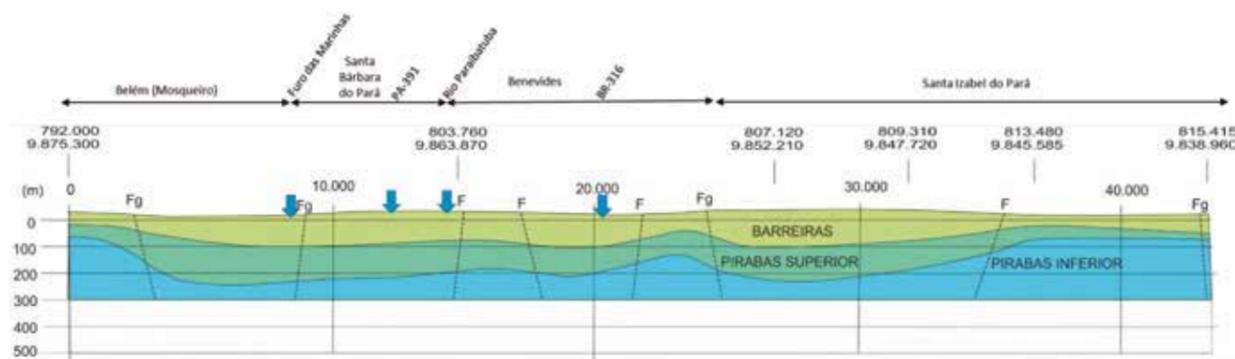
Seção Belém – Santa Izabel do Pará



Seção Outeiro – Ananindeua



Seção Mosqueiro – Santa Izabel do Pará



ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

O método utilizado neste estudo foi o *open end hole* – para meios não saturados. Os 40 ensaios foram realizados, sempre que possível, em três profundidades diferentes, de modo a se avaliar a consistência dos resultados e se obter um valor médio de condutividade hidráulica vertical (K_v) para cada ponto ensaiado.

Complementarmente, foram realizadas coletas de amostras compostas nos furos de sondagem onde se realizaram os ensaios de infiltração, com a finalidade de caracterização textural e granulométrica dos solos.

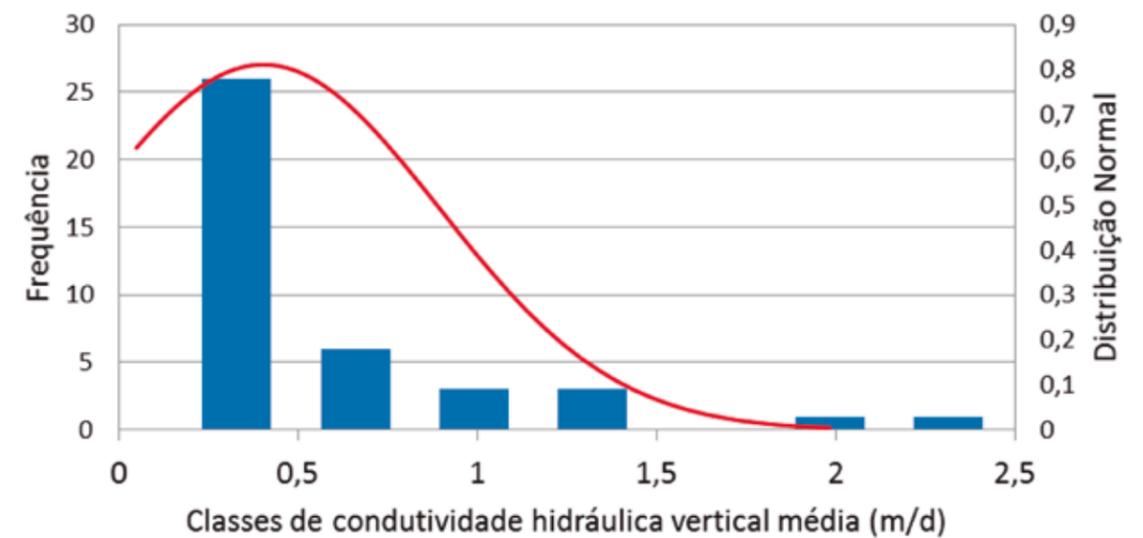
Os resultados de 40 ensaios de infiltração apontaram condutividades hidráulicas verticais variando de 0,000025 m/dia a 1,98 m/d; a média foi de 0,403 m/d e a mediana de 0,200 m/d. A distribuição da frequência dos valores de K_v , indicou que 65% dos valores são menores ou iguais a 0,5 m/d.

Os resultados das análises granulométricas revelaram solos compostos por misturas de areia com silte e argila. A fração arenosa é predominantemente constituída de areias muito finas a finas, ao mesmo tempo que são predominantes as texturas de areias muito uniformes. Essas características granulométricas são concordantes com os valores de K_v obtidos.

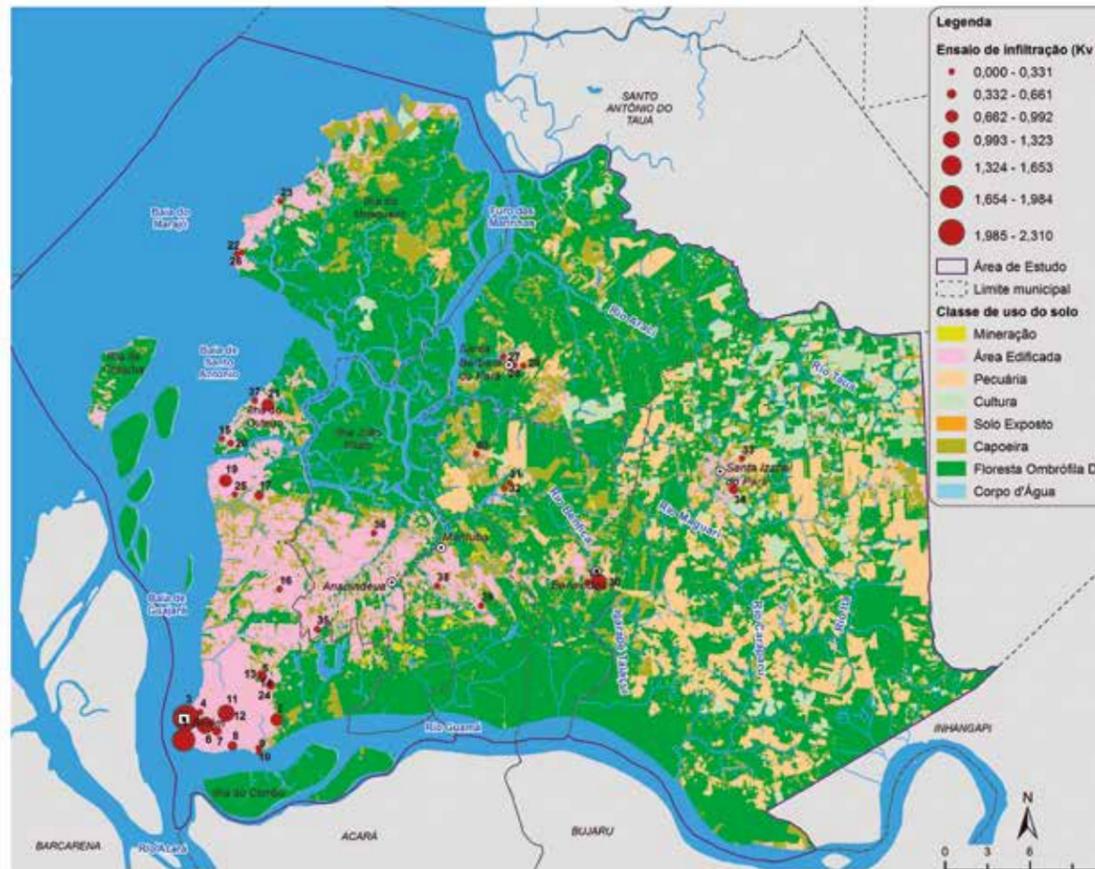


Não se observou uma diferenciação entre os resultados de K_v logrados em áreas urbanas e áreas não urbanizadas. Todavia, é importante salientar que os processos de impermeabilização do solo tendem a ser mais proeminentes em áreas antropizadas.

Frequência dos valores de condutividade hidráulica vertical



Histograma das condutividades hidráulicas verticais médias de cada ponto.



Mapa de distribuição das classes de condutividade hidráulica vertical no terreno.

HIDROGEOQUÍMICA

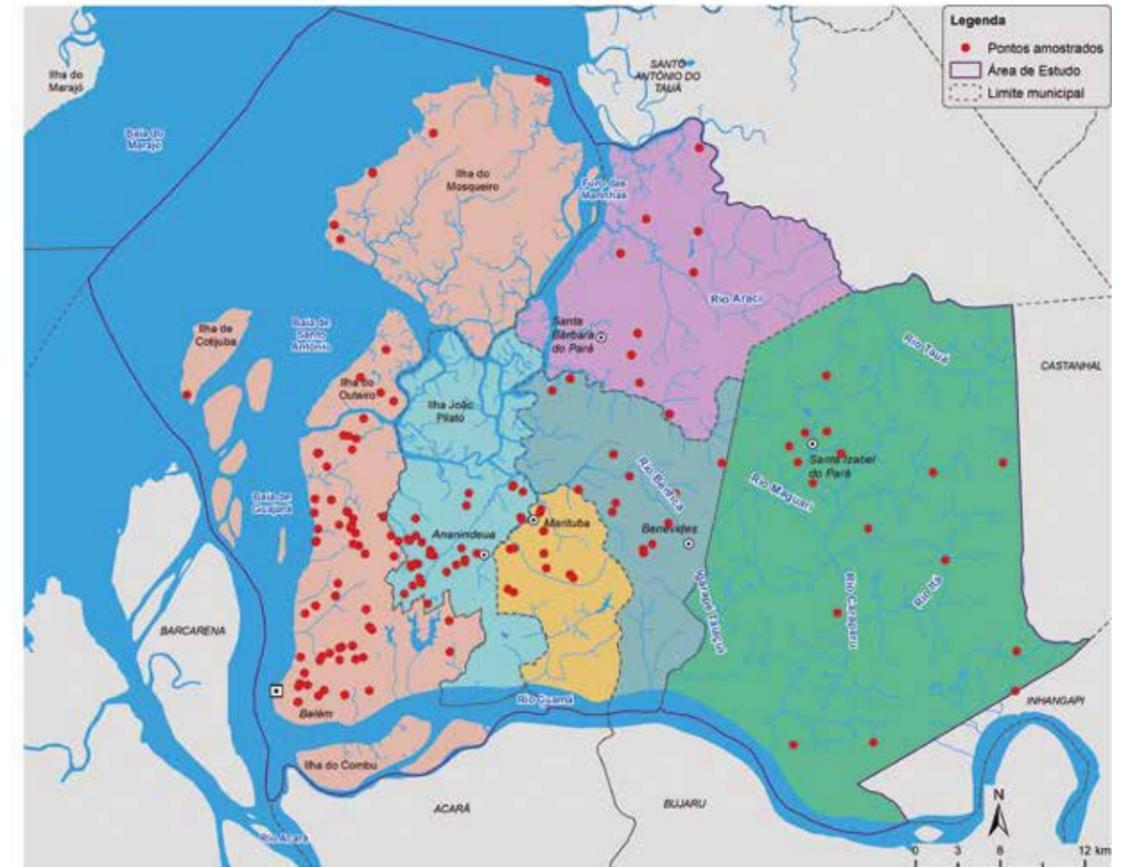
Para a caracterização hidroquímica das águas dos aquíferos Pós-Barreiras, Barreiras, Pirabas Superior e Inferior, foram realizadas duas campanhas de amostragem de águas subterrâneas poços tubulares na área de estudo. Os 22 parâmetros analisados nas duas campanhas foram temperatura, condutividade elétrica, pH, Eh, HCO_3^- , CO_3^{2-} , STD, cor, turbidez, dureza, Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe e Mn.



Medição em campo (T, pH, CE, Eh)

Na primeira campanha (06 a 08/2017), foram coletadas 150 amostras e na segunda campanha (11/2017 a 03/2018) foram coletadas 152 amostras. Na segunda campanha, também foram coletadas amostras para análises de índice de fenóis e BTEX, metais pesados, bacteriológicas, isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio (δD); carbono-14 (^{14}C); e trítio (^3H).

Mapa de localização dos pontos amostrados na área de estudo nas campanhas 1 e 2.



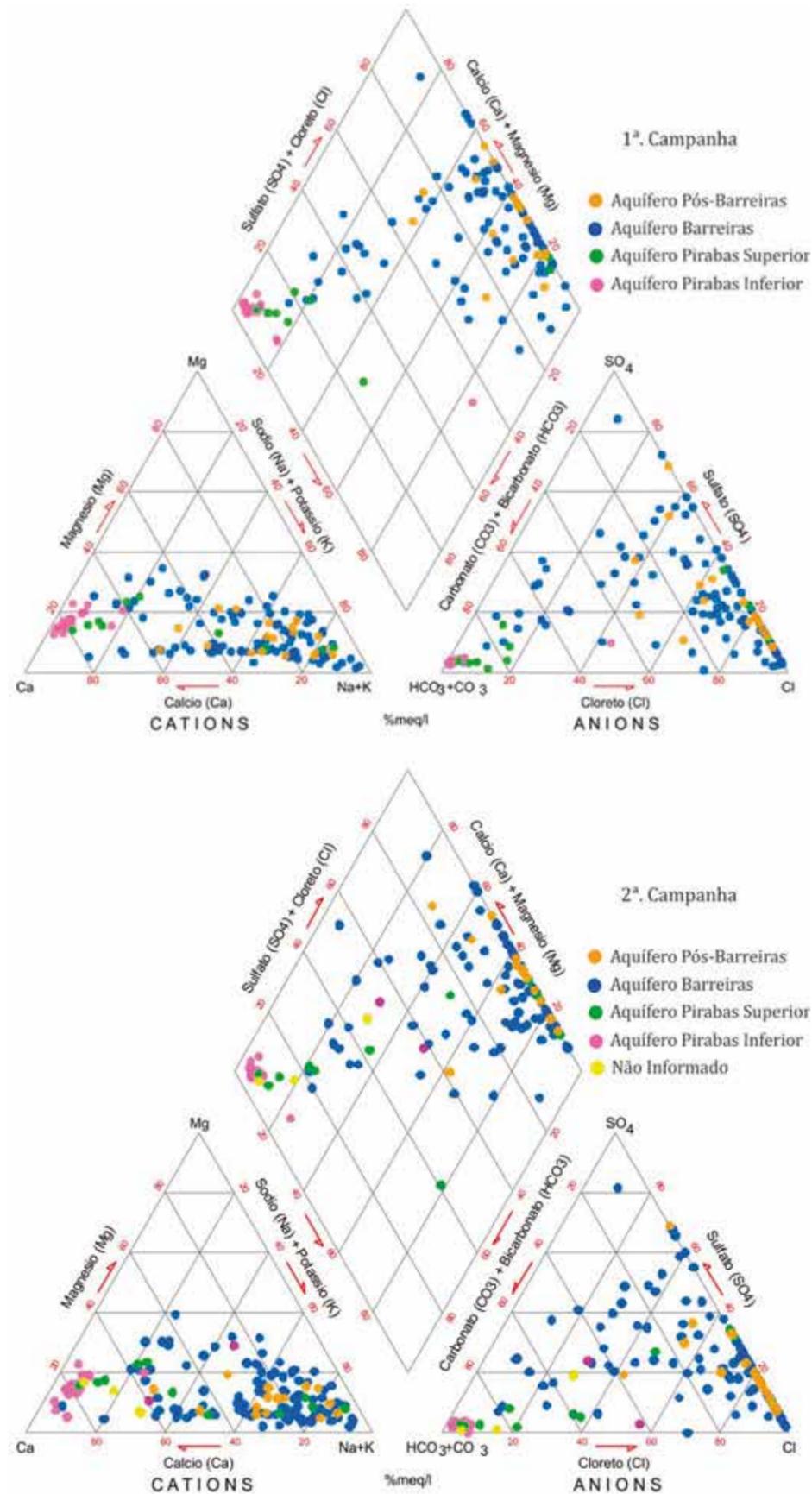
Classificação Hidroquímica das Águas

A classificação hidroquímica feita com auxílio dos diagramas de Piper mostrou que as águas amostradas no Aquífero Pós-Barreiras são, em sua maioria, cloretadas sódicas; do Aquífero Barreiras, também a maioria, cloretadas sódicas; e tanto do Aquífero Pirabas Superior como do Inferior as águas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas.

No geral, a classificação hidroquímica das amostras pelo diagrama de Piper permaneceu a mesma nas duas campanhas de amostragem.



Diagramas de Piper para amostras da primeira e segunda campanhas



O diagrama de Stiff contém linhas dispostas à esquerda e à direita a partir de um eixo vertical que representa o valor zero de concentração. Os cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+}) são plotados à esquerda, enquanto os ânions (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e NO_3^-) à direita desse eixo. As concentrações iônicas são expressas em miliequivalentes por litro (meq/L). Os pontos gerados são interligados por linhas, originando polígonos de várias formas e tamanhos, os quais expressam as características químicas das águas e permitem sua classificação e correlação. Quanto mais afastados os vértices entre si e maiores os lados dos polígonos, maior a concentração dos íons, ou seja, mais sais dissolvidos na água.

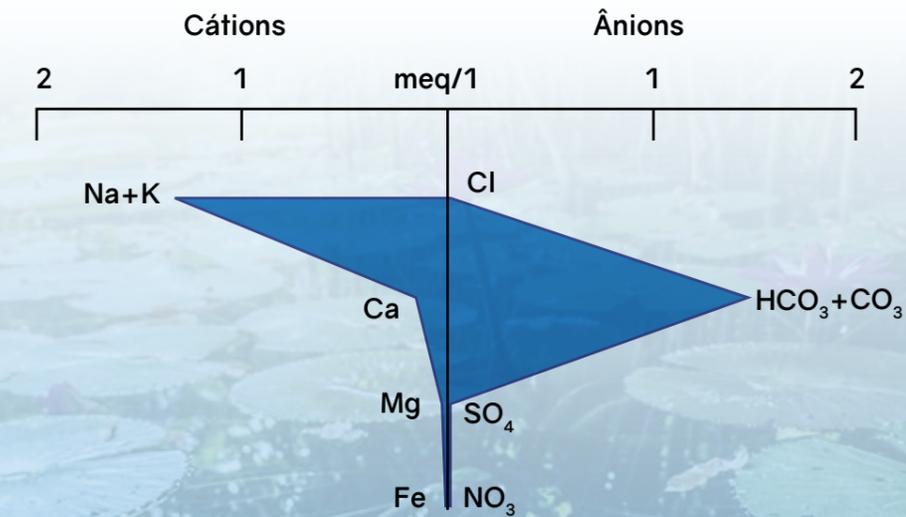


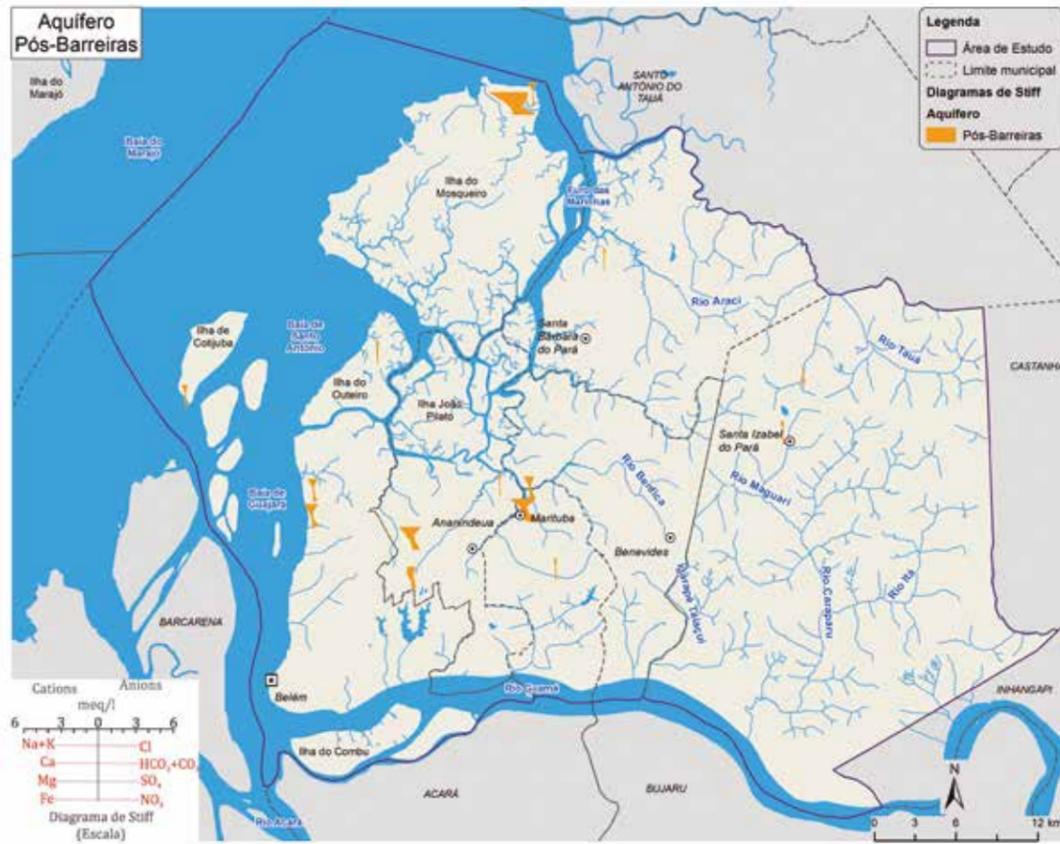
Diagrama de Stiff

A representação gráfica com a utilização do diagrama de Stiff facilita a visualização expedita da composição química das águas e permite a comparação de diferentes amostras.

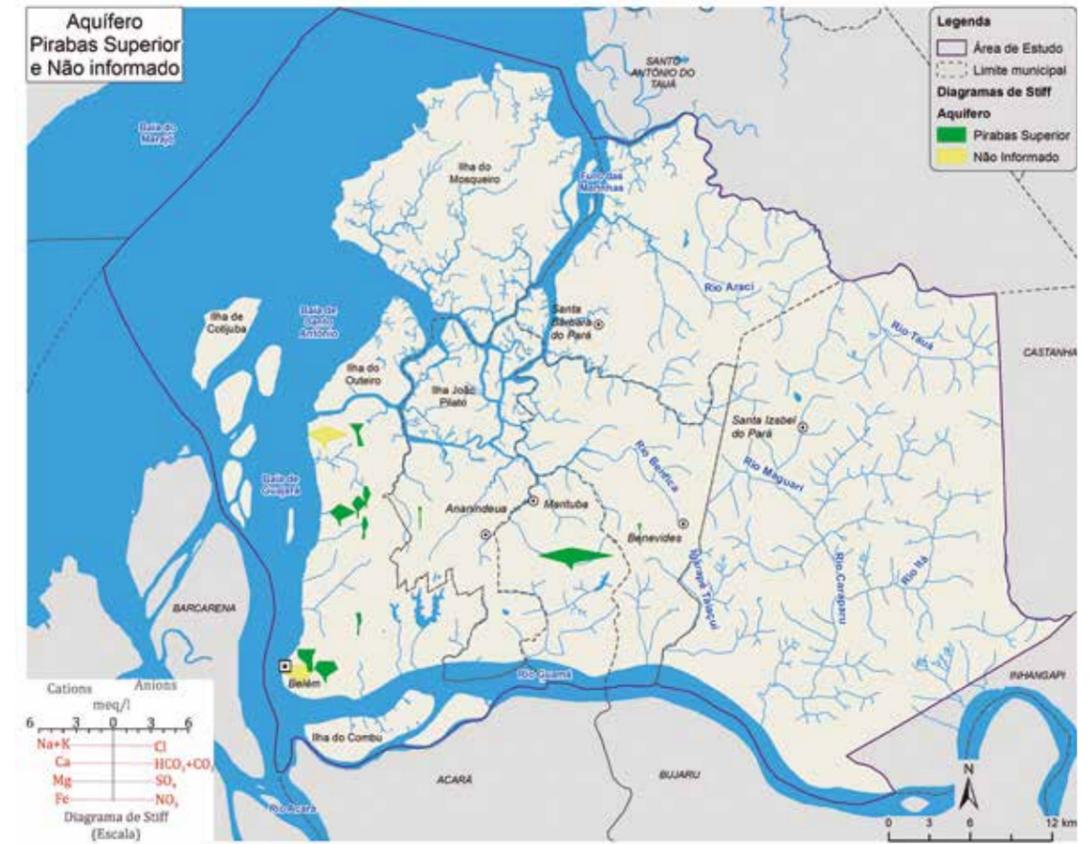
Os diagramas de Stiff evidenciaram as diferenças de concentrações iônicas das amostras. No Aquífero Pós Barreiras, as amostras são, em sua maioria, menos salinas, enquanto que as amostras do Aquífero Pirabas Inferior apresentam maiores salinidades. Observa-se também que as amostras do Aquífero Barreiras na porção sudoeste são mais salinas que as situadas nas porções leste e central, enquanto as amostras do Aquífero Pirabas Inferior não apresentam diferenças expressivas em relação às concentrações iônicas e seguem o mesmo padrão de classificação (bicarbonatadas cálcicas).

As amostras classificadas como cloretadas sódicas e sulfatadas cálcicas possuem baixas concentrações iônicas, com condutividades elétricas médias de 129 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 139 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1ª e 2ª campanhas) e de 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 122 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1ª e 2ª campanhas), respectivamente, sendo sódio, cloreto e nitrato os íons maiores nas cloretadas sódicas, e sulfato, cálcio, nitrato e cloreto nas sulfatadas cálcicas.

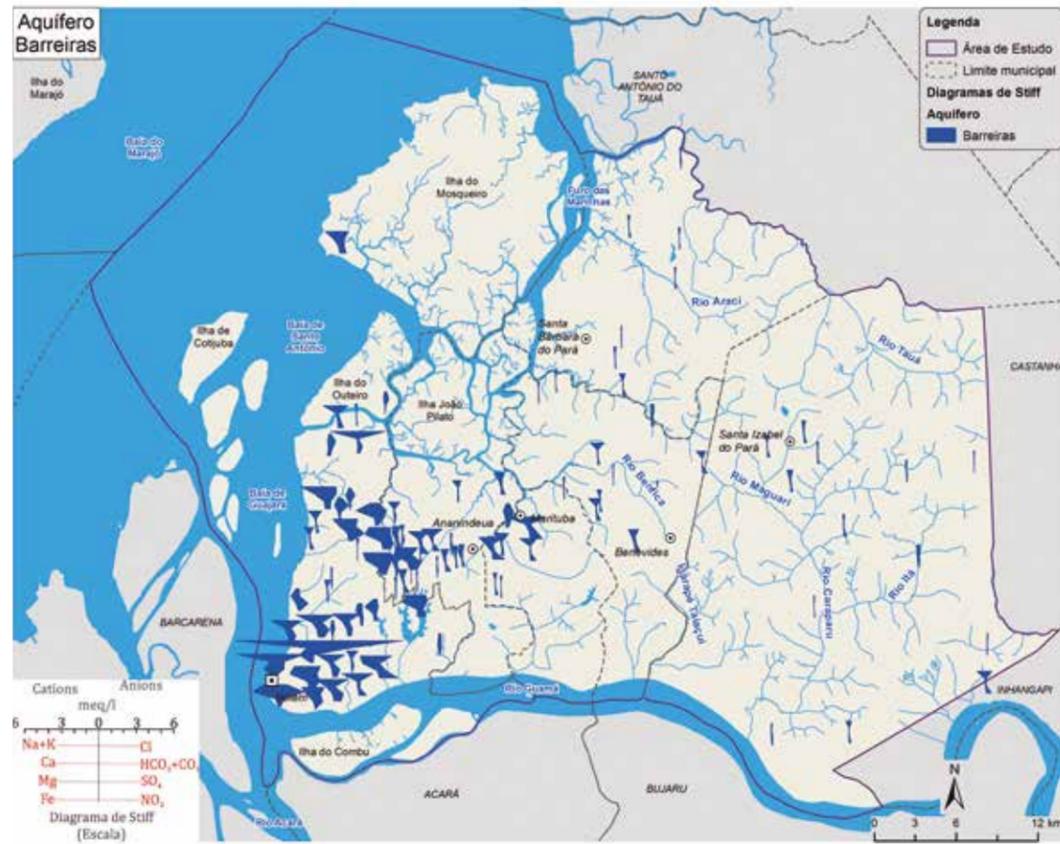
Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras do Pós-Barreiras.



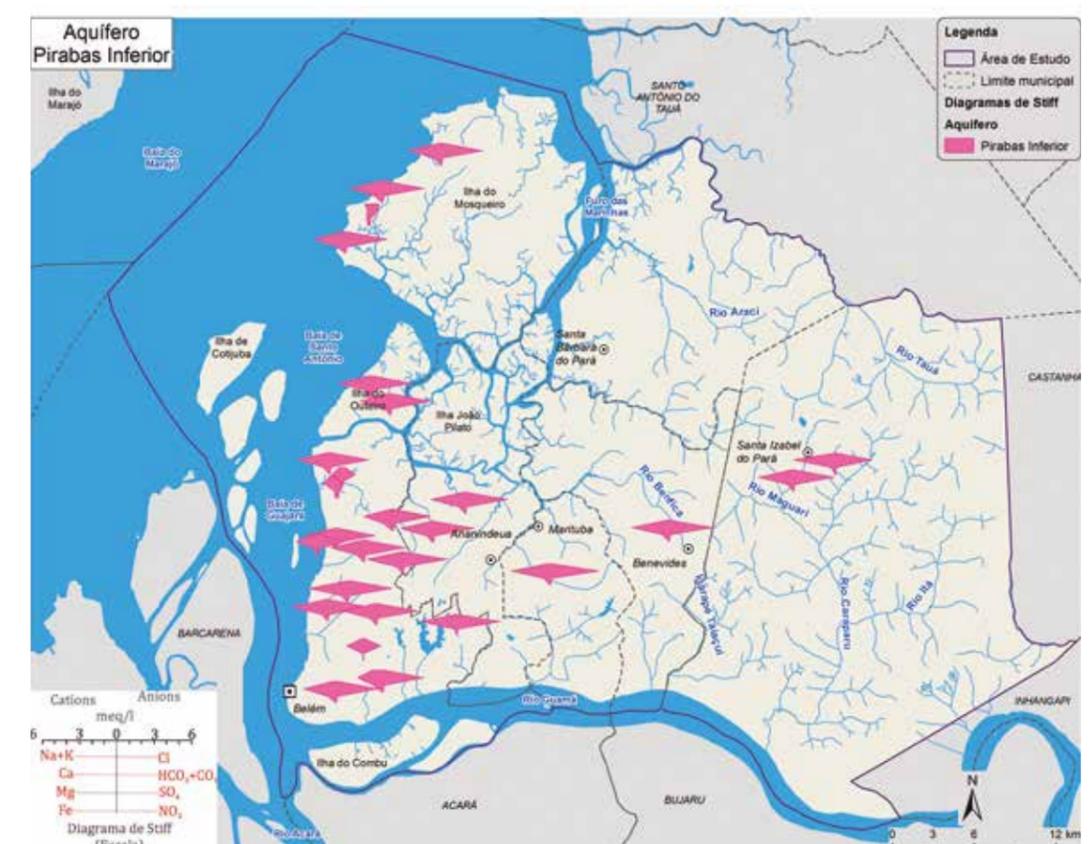
Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras do Pirabas Superior e não informadas.



Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras do Barreiras.



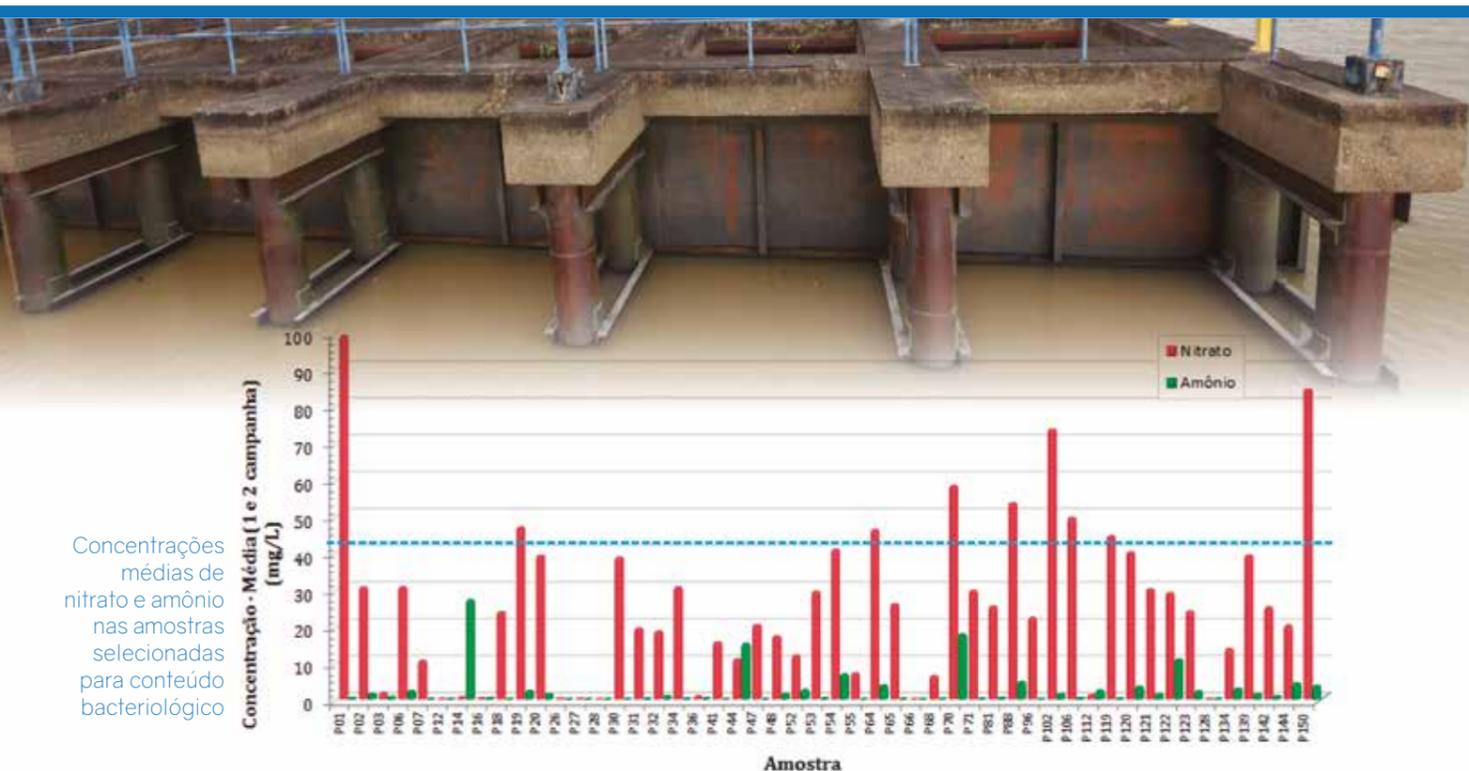
Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras do Pirabas Inferior.



Qualidade das Águas

Quanto à qualidade das águas, considerando a legislação vigente, os resultados mostraram que no que se refere aos parâmetros específicos seguem assim resumidos:

- Metais pesados – bário, níquel, zinco, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio e arsênio: a maioria das amostras selecionadas está abaixo dos respectivos valores máximos permitidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, e apenas uma amostra no Aquífero Barreiras apresenta valor para arsênio acima do limite estabelecido.
- Índice de fenóis: a maioria das amostras está abaixo do limite de quantificação praticável (LQP) aceitável para aplicação da resolução Conama 396/2008. No entanto, quatro amostras apresentam concentrações acima de 1 µg/L, necessitando de tratamento convencional prévio para consumo humano, conforme prevê a resolução Conama 20/1998. E uma amostra apresentou valor de 1,4 mg/L para índices de fenóis ultrapassando os valores máximos permitidos pelas legislações.
- Benzeno, tolueno, etilbenzeno, o-xileno, m,p-xileno e xileno: todas as amostras analisadas apresentam valores inferiores aos máximos permitidos nas citadas Portaria e Resolução.
- Conteúdo bacteriológico: dentre as amostras analisadas, apenas uma amostra apresentou resultados positivos para análises de coliformes termotolerantes e totais, como também para Escherichia Coli. Nessas amostras, os níveis de nitrato apresentaram-se pontualmente elevados, enquanto os de amônio comportaram-se em níveis geralmente baixos.



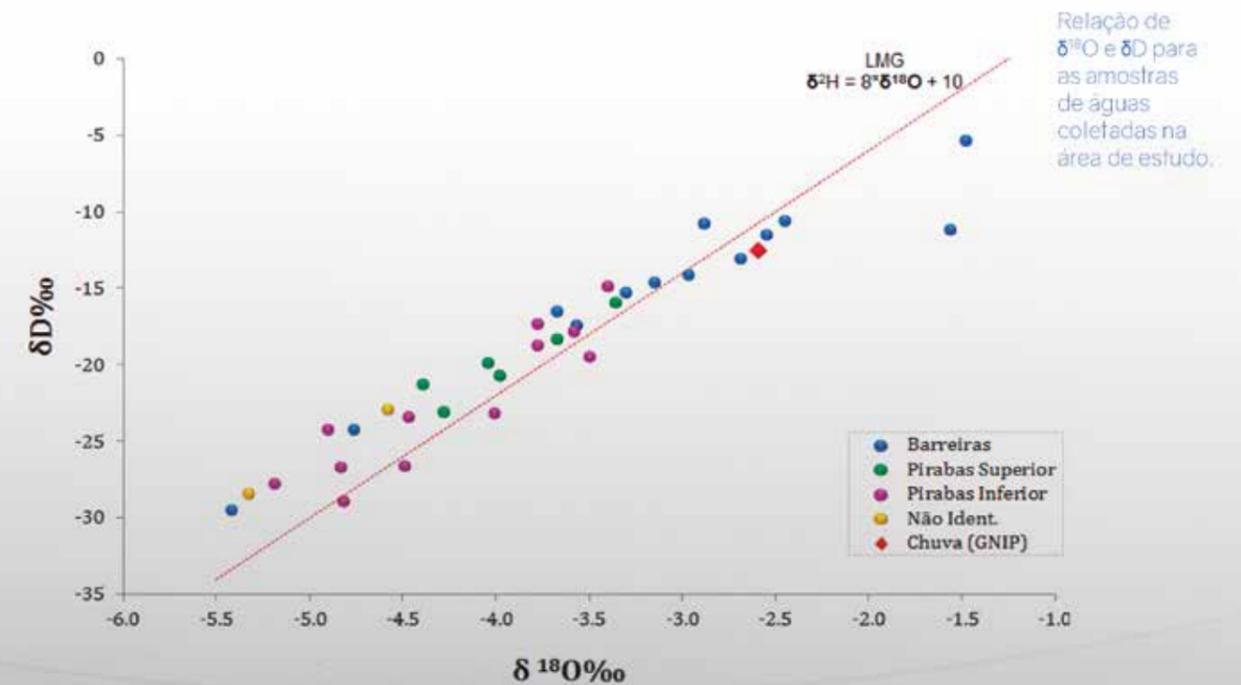
Análises Isotópicas

Isótopos Estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério ($\delta^2\text{H}$)

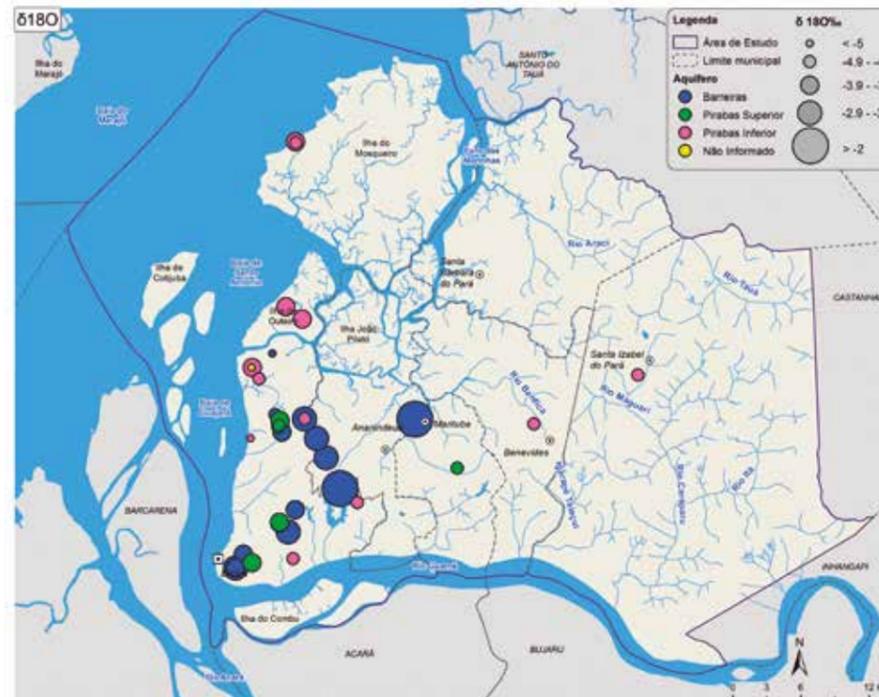
As razões isotópicas das análises para $\delta^{18}\text{O}$ variam no intervalo de -5.42‰ a -1.48‰, enquanto que os resultados para $\delta^2\text{H}$ oscilam de -29.6‰ a -5.4‰. A maioria das amostras tem composição isotópica próxima à da linha meteórica global (LMG), confirmando sua origem meteórica. A média da composição isotópica de águas de chuva (GNIP - 1965/1990) encontra-se próximo à das amostras do Aquífero Barreiras, aquífero mais raso.

As águas do Aquífero Barreiras apresentam predomínio dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -2,5‰ a -4,0‰, enquanto que os valores de $\delta^2\text{H}$ predominam entre -18,0‰ e -9,0‰. Nas amostras do Aquífero Pirabas Superior predominam valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -3,5‰ a -4,5‰ e de $\delta^2\text{H}$ entre -24,0‰ e -18,0‰. No Aquífero Pirabas Inferior os valores predominam entre -3,5‰ a -5,0‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e se distribuem entre -30,0‰ e -15,0‰ para $\delta^2\text{H}$.

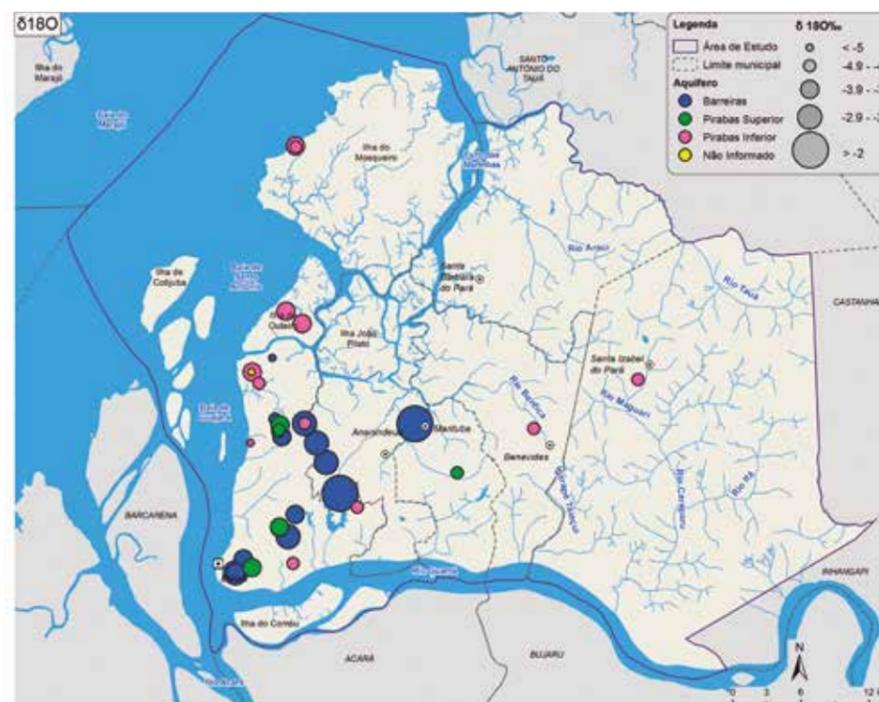
As amostras do Aquífero Barreiras são em geral mais enriquecidas isotopicamente que as águas do Aquífero Pirabas Inferior, diferenças mais evidentes nos mapas.



Distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas da área de estudo

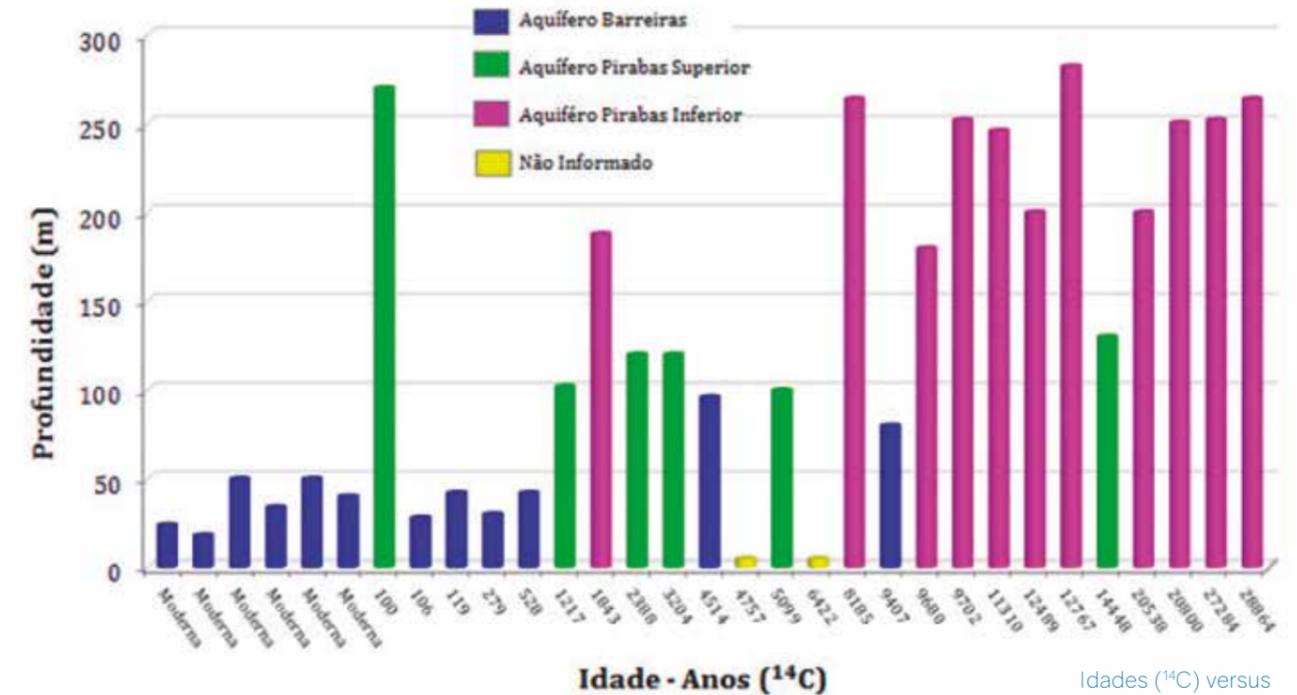


Distribuição de δD nas águas da área de estudo



Isótopos radioativos de Carbono 14 (^{14}C) e Trítio (^3H)

O ^{14}C e o T (^3H – Trítio) são amplamente utilizados na datação de água devido ao intrínseco tempo de meia-vida que possuem, respectivamente de 5.730 anos e 12,43 anos, que definem as faixas acessíveis de datação de 200 a 30.000 anos e 0 a 50 anos. Ambos os isótopos são de origem secundária e são produzidos na alta atmosfera em reações nucleares num bombardeio de fluxo de nêutrons da radiação cósmica secundária com átomos de nitrogênio presentes na atmosfera.



Idades (^{14}C) versus profundidades (m) das amostras dos pontos de coleta de água subterrânea, na região de Belém.

Na análise de ^{14}C , as idades encontradas variam de moderna a 9.407 anos para o Aquífero Barreiras; 100 anos a 14.448 anos para o Aquífero Pirabas Superior e chega a 28.864 anos para o Aquífero Pirabas Inferior.

Os resultados das análises de trítio (^3H) de água subterrânea nas áreas de estudo apresentam valores de $\delta^3\text{H}$ que variam até 1.53 TU, desta forma, temos águas com recarga submoderna e mistura entre recarga submoderna e recarga recente. Somente no Aquífero Barreiras foram identificadas águas provenientes de misturas de recarga submoderna com recarga recente.

Os resultados de toda avaliação hidroquímica permitiram concluir diferenças significativas, principalmente quando comparadas as águas do Aquífero Pirabas Inferior com os demais aquíferos estudados. As bicarbonatadas cálcicas predominam no aquífero Pirabas inferior, sendo suas águas mais salinas e mais alcalinas que das demais unidades aquíferas.

Observou-se também, águas com teores de nitrato elevados, ocasionalmente acima do permitido pela Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde, possivelmente relacionadas à contaminação antrópica. Algumas amostras apresentaram teores de ferro e manganês que ultrapassam o máximo permitido pela citada legislação.

TESTES DE AQUÍFERO

Foram realizados 8 testes com pares de poços de bombeamento e de observação para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região de Belém. Dois testes foram executados em poços que exploram o Aquífero Pirabas e 6 no Aquífero Barreiras.

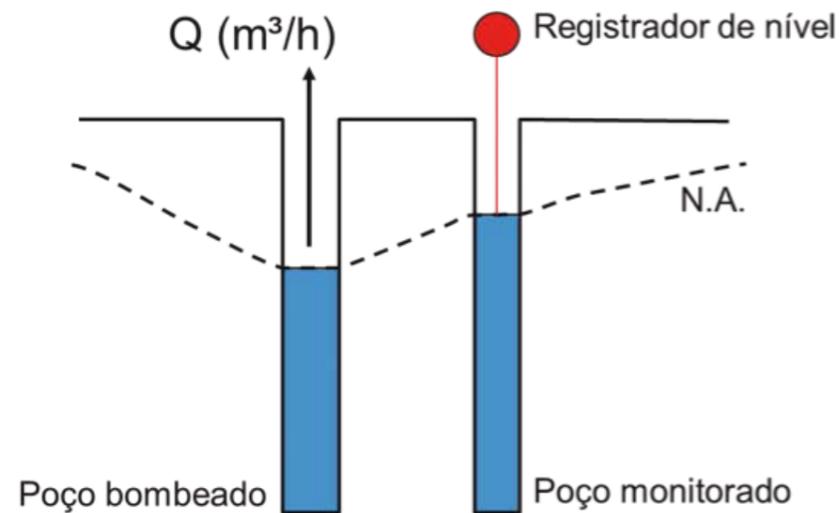
Distribuição dos testes de aquífero na área estudada.



A execução desses testes de aquífero consiste no bombeamento de um poço com descarga constante e acompanhamento da evolução do rebaixamento e da recuperação em um ou mais poços de observação, situados a uma distância conhecida em relação ao poço bombeado.

As medições de vazão foram feitas utilizando-se recipientes com volume aferido, medidor ultrassônico ou tubo pitot, dependendo das condições locais. A medição dos níveis de água nos poços foi feita manualmente com fita graduada ou automaticamente com sensor hidrostático SHT-150. Os dados foram analisados e interpretados no programa Aqtsolve™, desenvolvido pela HydroSOLVE Inc.

Esquema ilustrando o método de execução de teste de aquífero com auxílio de um poço de observação.



Para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos em cada teste foram avaliadas as curvas de rebaixamento e de recuperação dos pares de poços. As curvas de nível de água versus tempo passaram por uma análise para verificação do comportamento e da consistência dos dados. Nesta etapa, as curvas foram designadas conclusivas ou inconclusivas, respectivamente, para distinguir aquelas passíveis de utilização para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos, daquelas com comportamento desconforme. As curvas selecionadas foram inseridas no software Aqtsolve e os parâmetros foram calculados por meio da solução de Hantush-Jacob para aquíferos semiconfinados.

Gráfico Rebaixamento x Tempo - Poço UCB-1

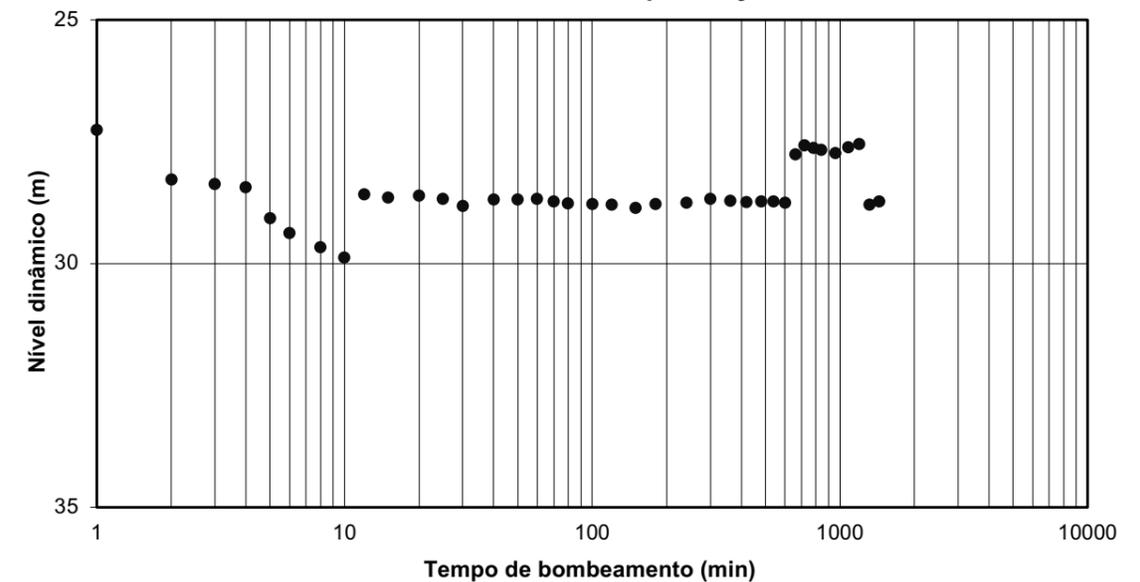


Gráfico Vazão x Tempo Poço UCB-1

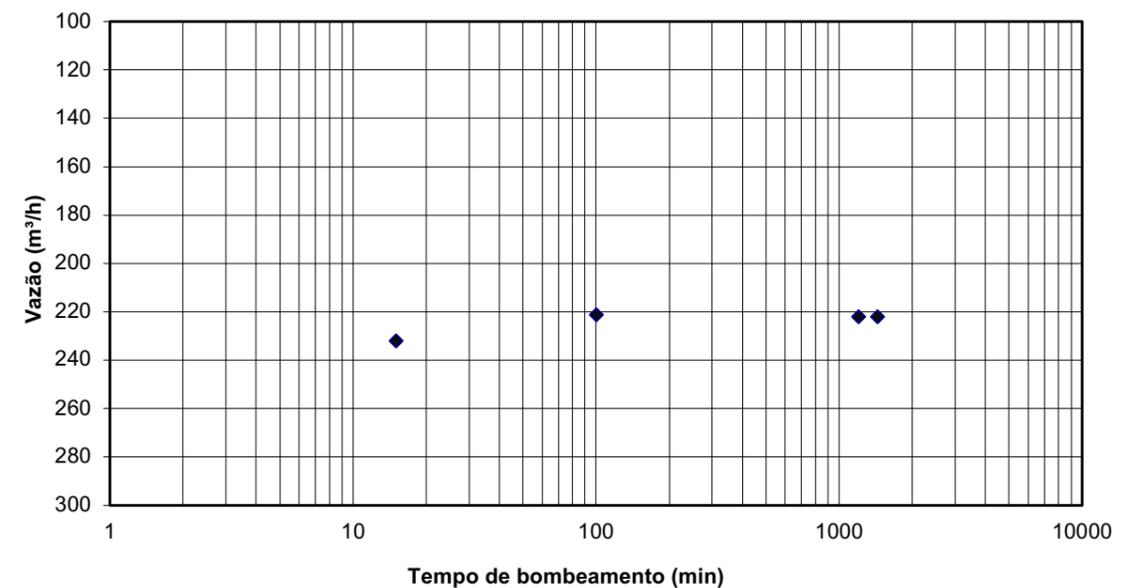
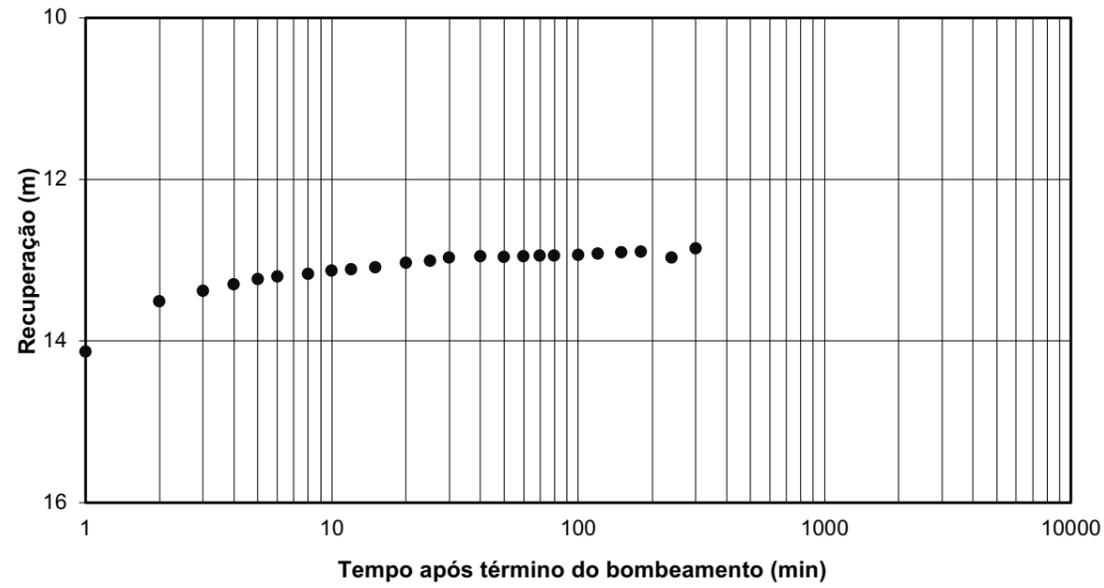


Gráfico Recuperação x Tempo do poço UCB-1



Os resultados dos testes de bombeamento revelaram valores de parâmetros hidrodinâmicos consistentes com o modelo hidrogeológico conceitual elaborado para os reservatórios subterrâneos da área de estudo.

Parâmetros hidrodinâmicos obtidos por sistema aquífero

Aquíferos	Transmissividade (m ² /dia)	Condutividade hidráulica (m/dia)	Coefficiente de armazenamento
Barreiras	2,64 a 252	0,09 a 3,88	1,90E-6 a 4,28E-6
Pirabas	641 a 1890	6,41 a 11,12	8,98E-4 a 3,90E-3



Testes de aquífero realizados. (a) poço bombeado, em Belém; (b) medição de vazão durante o teste, em Cotijuba; (c) poço de observação, em Benevides; e (d) poço de observação, em Belém (PA).





AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

SISTEMAS AQUÍFEROS

Os aquíferos da região de Belém foram reunidos em dois sistemas principais: Sistema Aquífero Barreiras e Sistema Aquífero Pirabas.

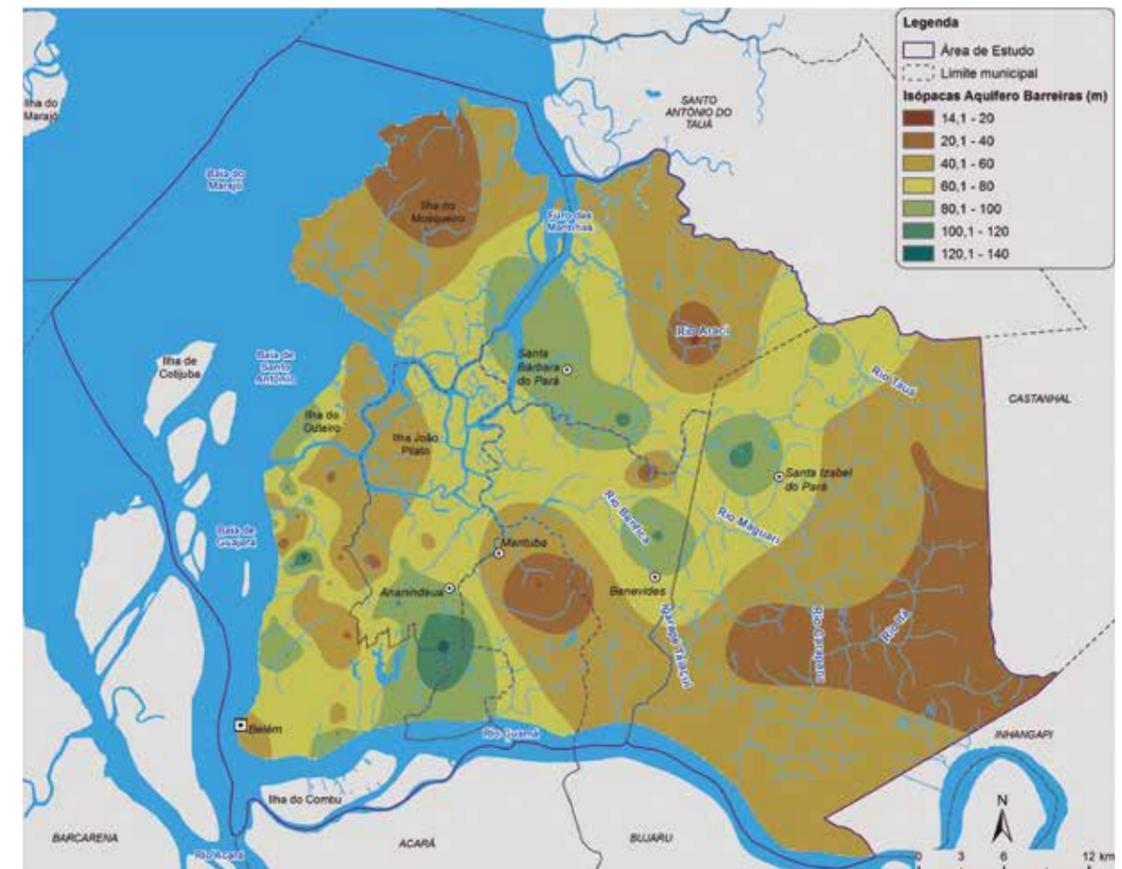
O **Sistema Aquífero Barreiras**, composto por sedimentos das coberturas recentes e das unidades Pós-Barreiras e Barreiras, distribui-se pelos municípios de Ananindeua, Belém, Benevides, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará, onde ocupa área total de 1.893 km. O **Sistema Aquífero Pirabas**, formado pelos sedimentos da unidade litoestratigráfica homônima, ocorre somente em subsuperfície, encimado pelo Sistema Aquífero Barreiras.

Área de ocorrência dos sistemas aquíferos da região de Belém e adjacências

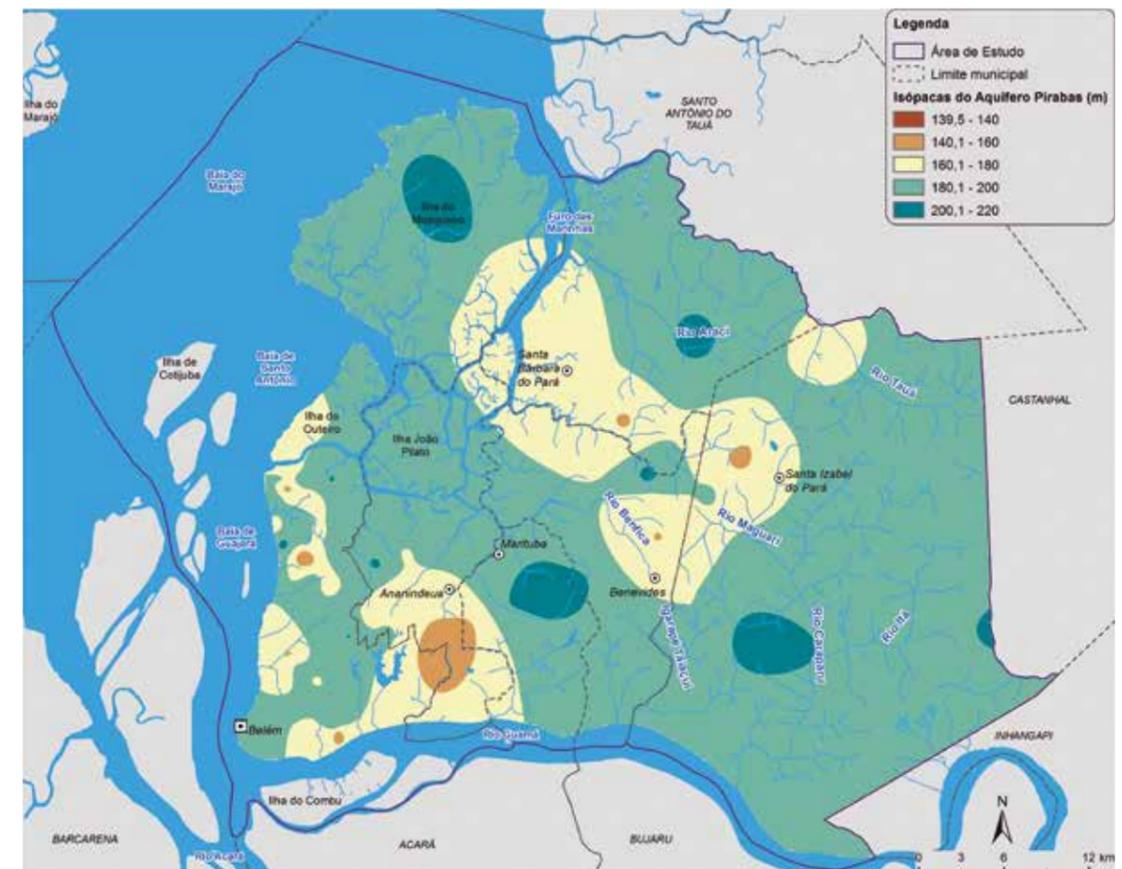
Sistema Aquífero	Unidade geológica	Área (km ²) no município						Total
		Ananindeua	Belém	Benevides	Marituba	Santa Bárbara do Pará	Santa Izabel do Pará	
Barreiras	Coberturas recentes	60,45	197,57	30,19	27,04	53,26	79,42	447,93
	Pós-Barreiras	98,17	272,39	47,29	32,29	158,58	256,46	865,18
	Barreiras	10,95	23,60	102,46	36,71	47,49	359,12	580,33
	Total	169,57	493,56	179,94	96,04	259,33	695,00	1893,44
Pirabas	Pirabas	169,57	493,56	179,94	96,04	259,33	695,00	1893,44

As espessuras dos aquíferos na região ainda são pouco conhecidas, uma vez que a distribuição e densidade de informações de subsuperfície, majoritariamente constituída por poços, não é uniforme e concentra-se nas áreas mais urbanizadas.

Utilizando dados de levantamentos geofísicos realizados pelo método da eletrorresistividade (SEV – sondagens elétricas verticais) e de perfisagens geofísicas de poços, foram elaborados mapas de distribuição das espessuras dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas. As espessuras do Sistema Aquífero Barreiras variam de 20 m a pouco mais de 120 m, enquanto as espessuras do Sistema Aquífero Pirabas variam de 140 m a 220 m.



Distribuição das espessuras do Aquífero Barreiras na área estudada.



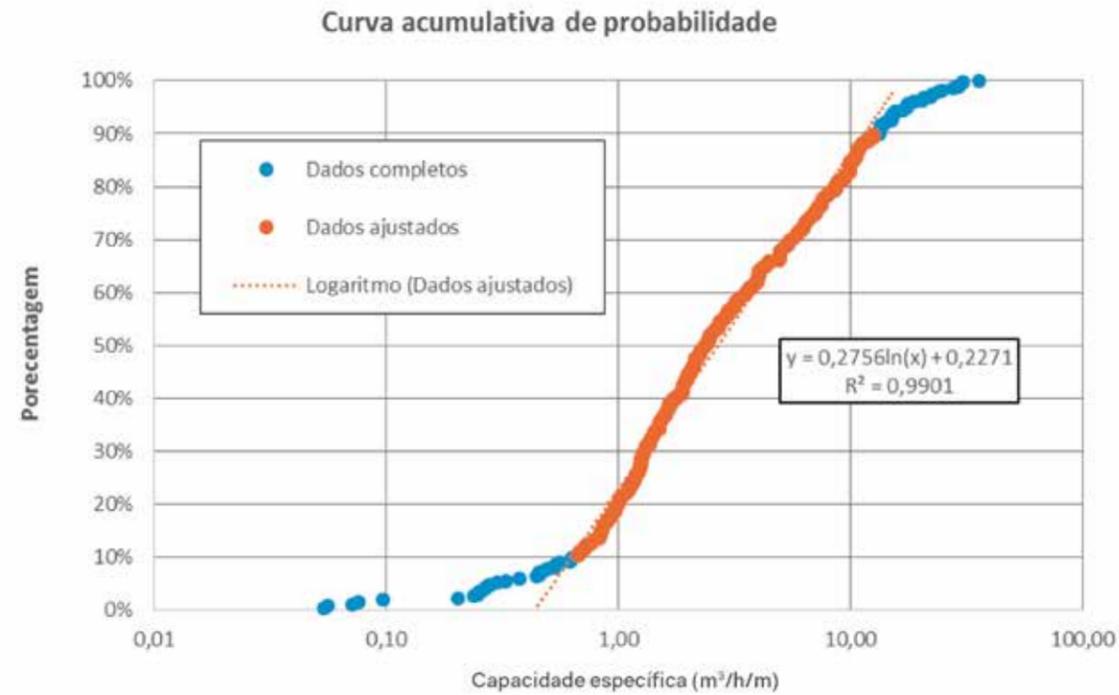
Distribuição das espessuras do Aquífero Pirabas na área estudada.



Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m³/h/m) do Sistema Aquífero Barreiras.

Dados de capacidade específica (razão entre a vazão de produção e rebaixamento) de poços perfurados na área permitiram avaliar a potencialidade dos aquíferos.

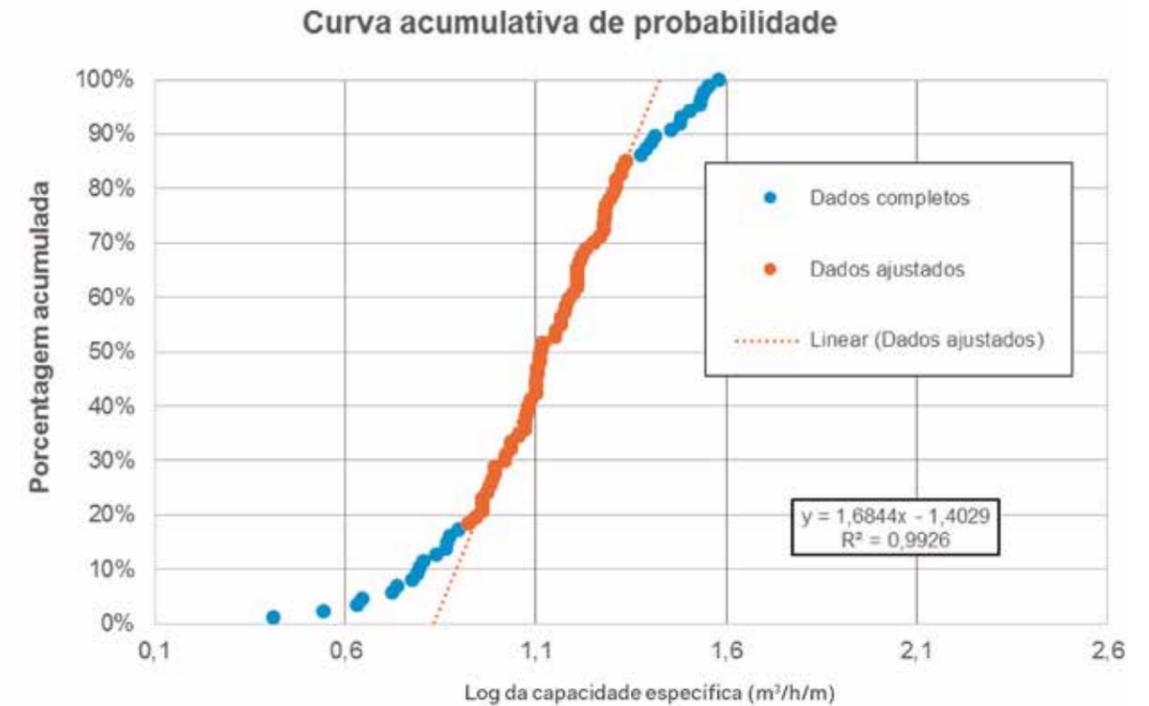
O Sistema Aquífero Barreiras apresentou capacidade específica mediana de 2,68 m³/h/m e vazões variando de 13 m³/h a 100 m³/h.



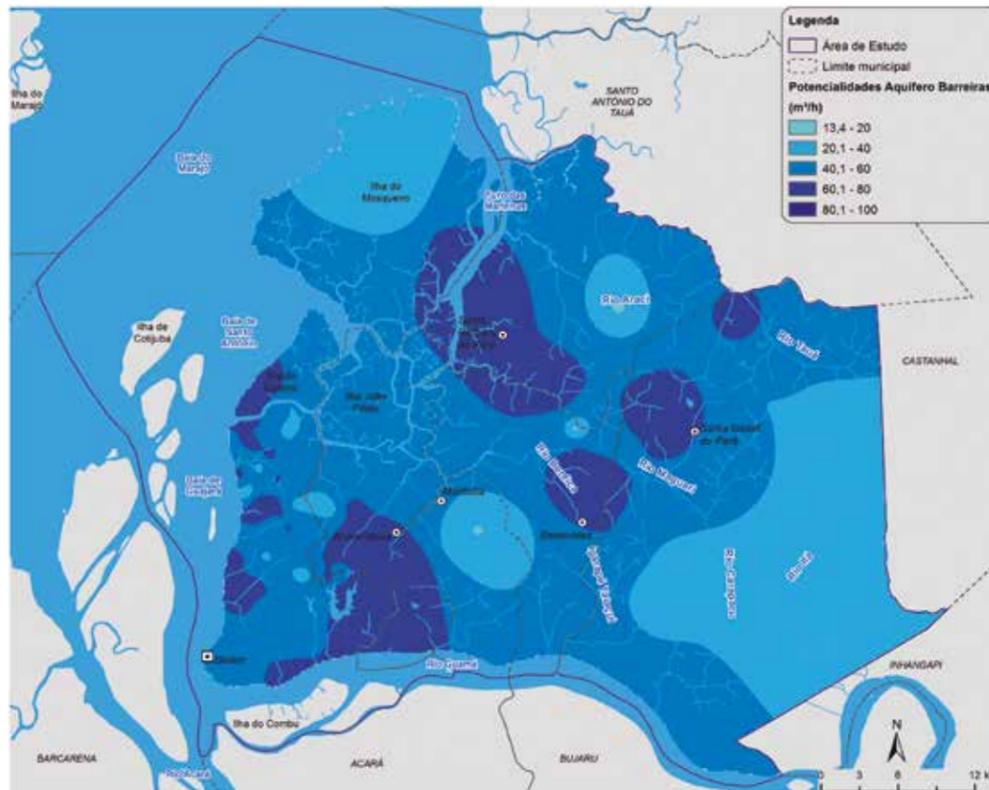
Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m³/h/m) do Sistema Aquífero Pirabas.

O Sistema Aquífero Pirabas apresentou capacidade específica mediana de 13,48 m³/h/m e vazões variando de 140 m³/h a 350 m³/h.

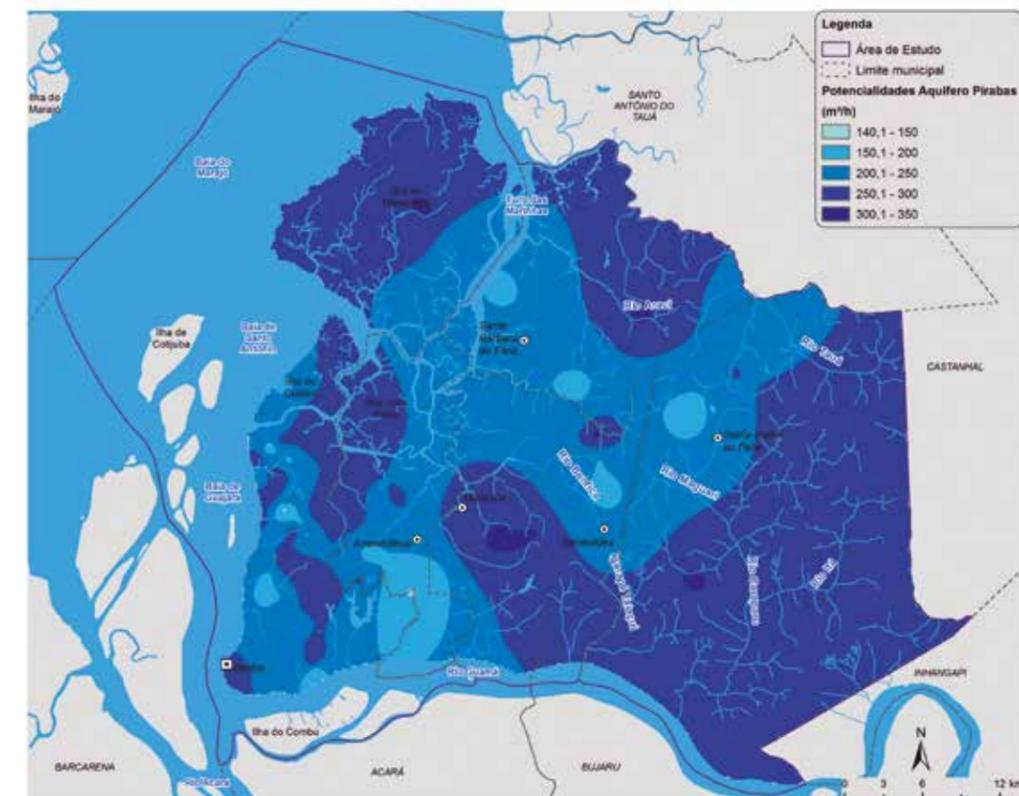
As vazões passíveis de extração atestam as excelentes potencialidades dos sistemas aquíferos da região de Belém.



Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém e municípios adjacentes.



Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém e municípios adjacentes.



MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

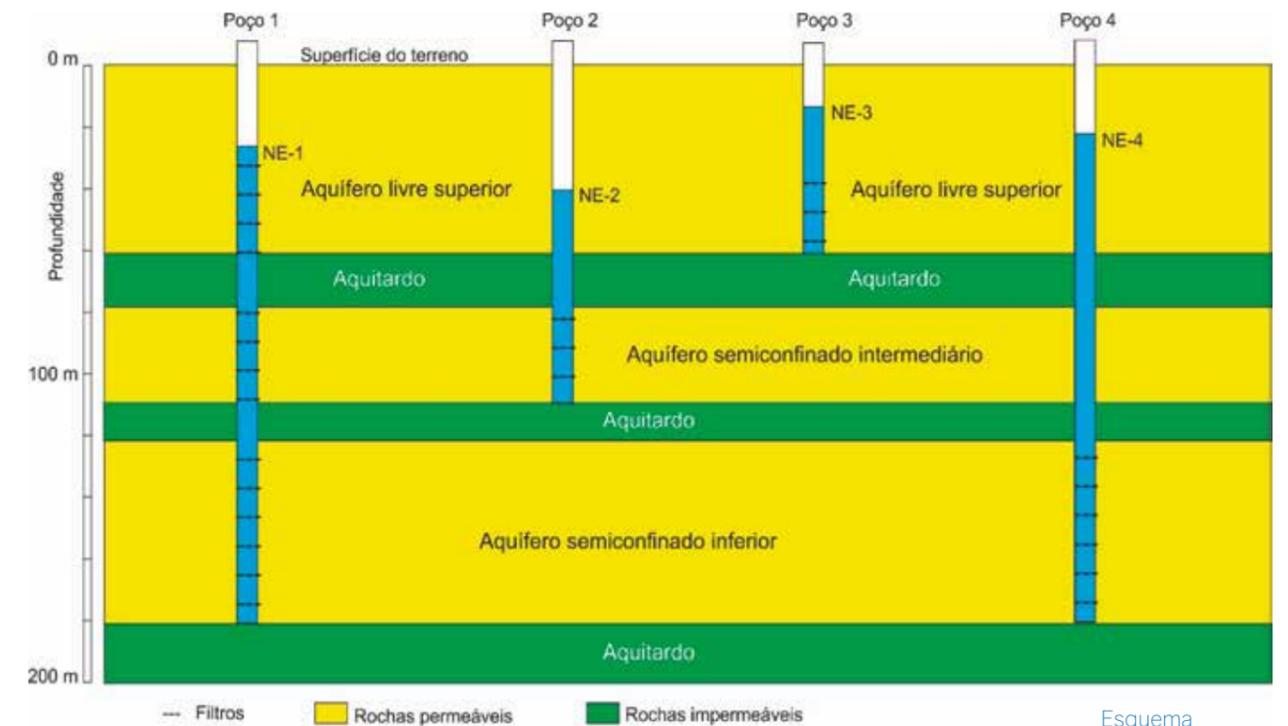
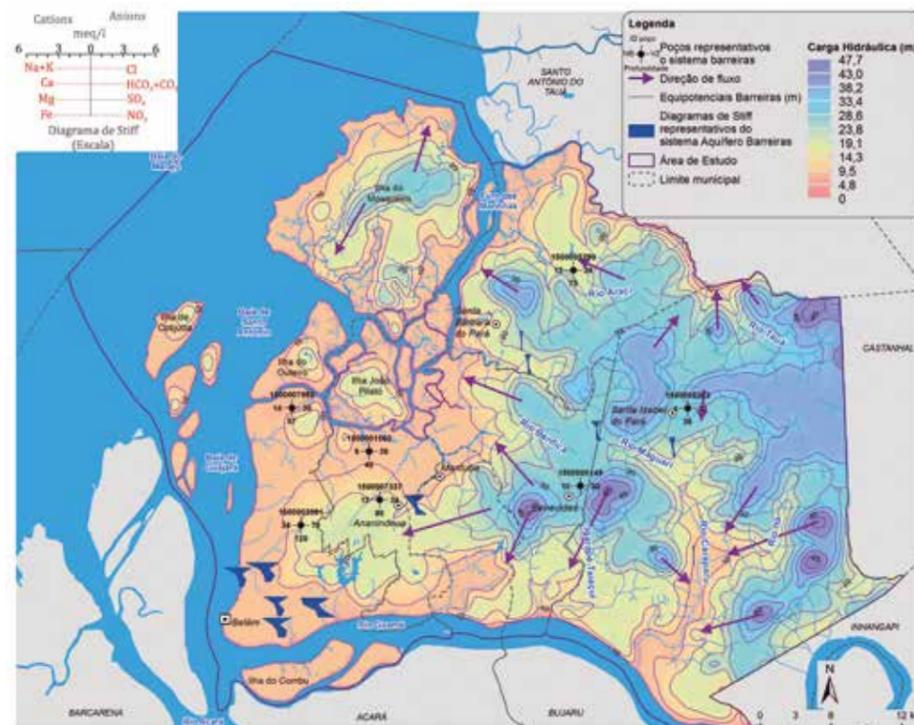
Os reservatórios subterrâneos da região de Belém e entorno compreendem um **sistema multicamadas típico**, recoberto por um aquífero raso livre. O Sistema Aquífero Barreiras, cujas rochas constituintes afloram em toda a extensão da área de estudo, compreende reservatórios livres em sua porção superior e semiconfinados em sua porção inferior, enquanto o Sistema Aquífero Pirabas, de ocorrência apenas em subsuperfície, é composto exclusivamente de reservatórios semiconfinados.

O sistema Pirabas compreende aquíferos espessos encerrados por camadas impermeáveis a semipermeáveis. Dados de poços e de perfilações indicam sucessão com recorrência frequente de camadas arenosas e argilosas. As camadas aquíferas predominam sobre as de aquíardos/aquicludes, sendo que os mais espessos e com menor frequência de intercalações argilosas situam-se na porção inferior do sistema; por esta razão, são os reservatórios mais explorados pelo sistema público de abastecimento e grandes indústrias.

O Sistema Aquífero Barreiras é constituído por aquíferos menos espessos que se intercalam a camadas impermeáveis a semipermeáveis. A frequência dos reservatórios arenosos é variável; em determinados locais, as camadas aquíferas predominam sobre as de aquíardos/aquicludes, em outros ocorre o inverso.

Nas porções superiores do Sistema Barreiras ocorrem aquíferos livres que descarregam suas águas para a rede hidrográfica da área, como demonstrado pela potenciometria. Por outro lado, os sistemas multicamadas caracterizam-se pelas cargas hidráulicas diferenciais existentes em cada um dos vários reservatórios componentes, de tal sorte que o nível de água registrado num poço representa a interação entre os níveis de água dos aquíferos atravessados e cobertos por filtros. Como as cargas hidráulicas dos sistemas multicamadas são reflexo dessas interações e não de um único aquífero, não são indicadas para elaboração de mapas potenciométricos.

Mapa hidrogeológico do Aquífero Barreiras



Esquema mostrando a variação das cargas hidráulicas de aquíferos multicamadas encimados por aquífero livre.

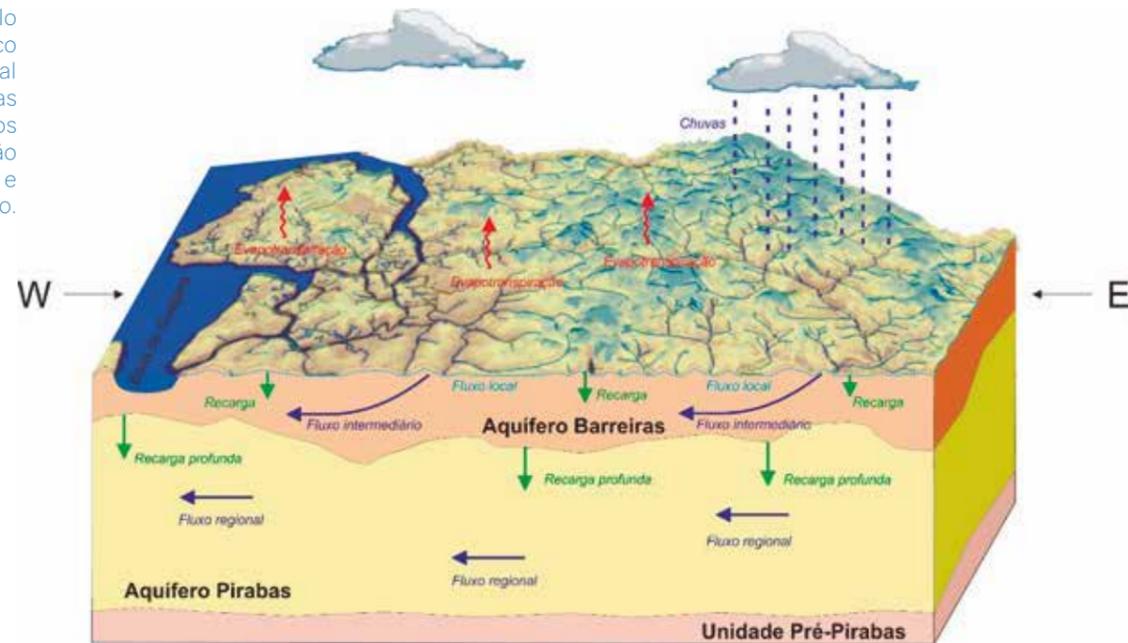
A recarga, alimentação desses reservatórios subterrâneos é feita a partir das chuvas abundantes durante o ano todo na região. As chuvas atingem média histórica de 2.642 mm/ano, distribuídas nos períodos chuvoso (1.914 mm), de dezembro a maio, e de estiagem, de junho a novembro (729 mm). Ao atingir o solo, a maior parte da água das precipitações atmosféricas evapora; uma pequena parcela se transforma em escoamento superficial das bacias hidrográficas da região e uma parcela menor infiltra-se no terreno, e constitui a recarga dos sistemas aquíferos.

A recarga direta proporcionada pelas precipitações atmosféricas foi estimada em 10,58 m³/s ou 176 mm/ano. Este valor corresponde a 6% do total médio pluri-anual precipitado na área.

A maior parte dessa recarga ocorre nos aquíferos rasos livres, integrantes do Sistema Aquífero Barreiras, e o volume corresponde à reserva renovável anual. Uma pequena parcela dessa recarga infiltra-se através das camadas semiconfinantes (aquíardos) da base dos aquíferos livres e atinge os reservatórios mais profundos, constituídos por rochas da Formação Pirabas. O fluxo descendente é governado pela diferença de carga hidráulica, maior nos aquíferos livres superiores.

Em alguns casos, as camadas semiconfinantes podem não ser lateralmente extensas e permitir o contato hidráulico com os reservatórios livres superiores, facilitando o processo de recarga profunda. O modelo hidrogeológico conceitual é então proposto a partir do arcabouço hidrogeológico e da dinâmica de circulação da água subterrânea nos sistemas aquíferos da região de Belém.

Modelo hidrogeológico conceitual dos sistemas aquíferos da região de Belém e entorno.



As descargas naturais do aquífero raso livre ocorrem através da descarga extensa rede hidrográfica instalada na área. As inúmeras feições hídricas superficiais, topografia plana, baixas altitudes e nível de água raso indicam que a maior parte da área se comporta, predominantemente, como zona de descarga das águas subterrâneas.

As equipotenciais dos aquíferos rasos livres mostram que o fluxo subterrâneo natural ocorre no sentido das áreas de descarga, representadas pelas drenagens e porções mais deprimidas do terreno. O fluxo subterrâneo geral ocorre a partir da porção oriental, para as áreas de altitudes baixas que ladeiam o Rio Guamá e a Baía do Guajará.

Admite-se que o escoamento subterrâneo dos aquíferos confinados e semiconfinados, reunidos nos sistemas Barreiras e Pirabas, ocorra no sentido de NE para SW, seguindo a mesma tendência do mergulho regional das unidades litoestratigráficas componentes desses sistemas. Na área de estudo, dados de níveis estáticos de poços não caracterizam condições de surgência nos sistemas confinados a semiconfinados.

As rochas componentes desses sistemas aquíferos apresentam, no geral, elevadas condutividades hidráulicas que favorecem a obtenção de excelentes vazões específicas nos poços produtores, as quais podem ser superiores a 20 m³/h/h. Os resultados de testes de interferência realizados na área de estudo apontaram transmissividades variando de 641 m²/d a 1.890 m²/d, condutividades hidráulicas de 6,41 m/d a 11,12 m/d e coeficiente de armazenamento de 8,98E⁻⁴ a 3,90E⁻³ para o Sistema Aquífero Pirabas; e transmissividades de 2,64 m²/d a 252 m²/d, condutividades hidráulicas de 0,09 m/d a 3,88 m/d e coeficiente de armazenamento de 1,90E⁻⁶ a 4,28E⁻⁶ para o Sistema Aquífero Barreiras.

A área estudada pode ser comparada às wetlands descritas em várias partes do globo, definidas como áreas permanentemente ou sazonalmente saturada de água. Por se situarem em regiões topograficamente mais baixas em relação às porções circunvizinhas, essas áreas concentram tanto fluxos superficiais como fluxos subterrâneos que interagem entre si, num processo extremamente

dinâmico, onde as águas ora se infiltram no terreno, ora ascendem à superfície, dependendo da quantidade de chuva precipitada. Essa dinâmica torna-se ainda mais complexa nas áreas antropizadas com presença de grande número de poços produtores, nas quais oscilações de nível provocadas pela extração da água subterrânea promovem alterações na carga hidráulica.

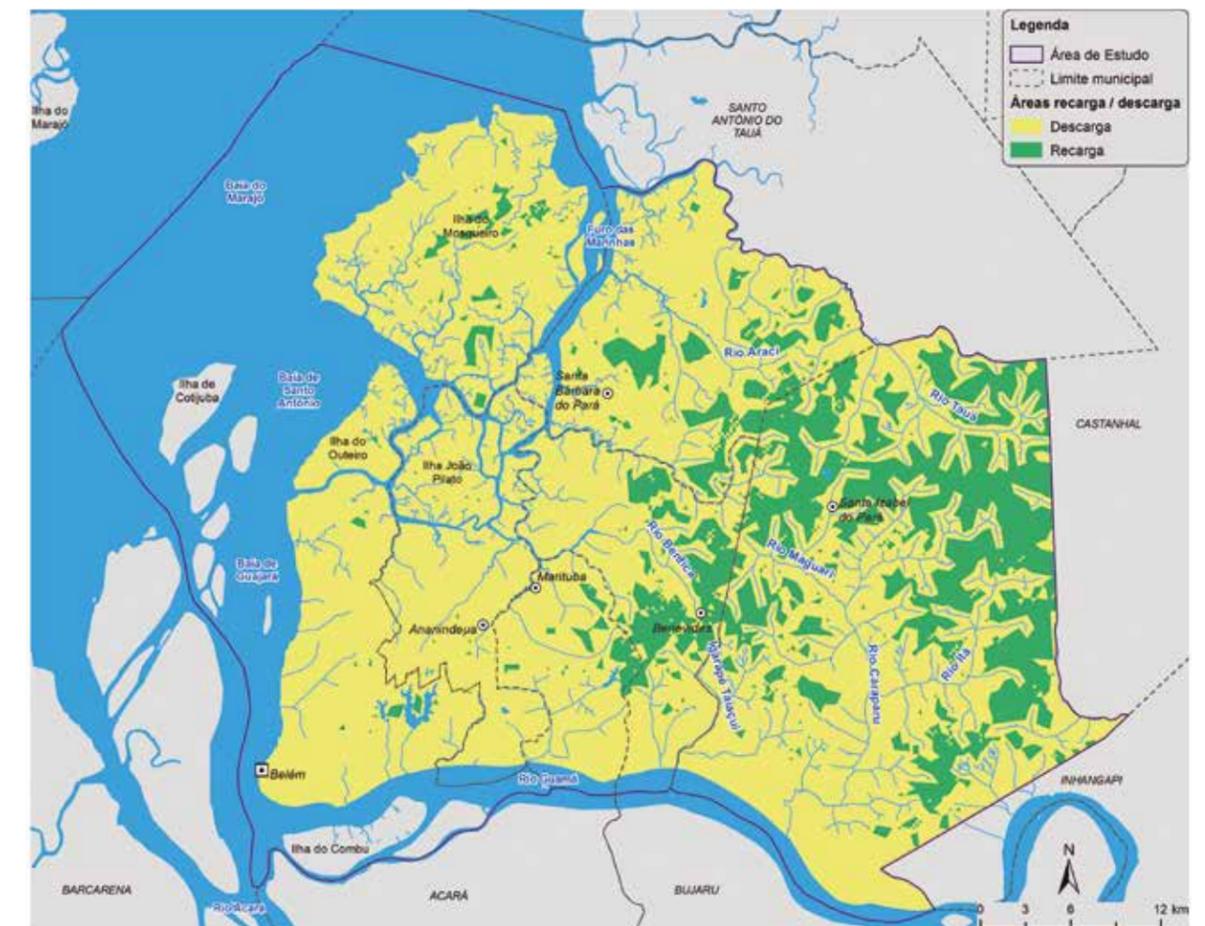
RECARGA E BALANÇO HÍDRICO

Recarga é definida como a água que se move da superfície do terreno ou da zona insaturada para a zona saturada, sendo de vital importância para entendimento do ciclo hidrológico, bem como para aplicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos (NIMMO et al., 2005).

A recarga garante o reabastecimento do aquífero e, conseqüentemente, a manutenção do suprimento de água dos rios e preservação dos ecossistemas, e assume condição fundamental em áreas onde a água subterrânea é intensamente explorada em decorrência das atividades humanas.

As condições de recarga dependem de vários fatores, como quantidade e intensidade das chuvas, evaporação, permeabilidade e topografia dos terrenos, cobertura vegetal, uso do solo, etc. Dentre estes fatores, sem dúvida, o clima é o que tem maior influência no tempo e no espaço na distribuição da recarga.

Áreas de recarga e descarga



A estimativa da recarga dos aquíferos livres situados nas porções superiores do Sistema Barreiras é de 10,58 m³/s, admitido para a recarga direta dos aquíferos superficiais. Este valor representa 6% da precipitação média total anual de 2.944 mm na área estudada equivalente à vazão de 176,72 m³/s.

Os aquíferos confinados podem não estar perfeitamente isolados dos aquíferos livres superficiais quando as camadas confinantes não são totalmente impermeáveis ou quando são descontínuas. A percolação de água através das camadas confinantes (aquítardos) alcança os reservatórios mais profundos e é responsável pela recarga dos aquíferos classificados como confinados drenantes.

Segundo ANA (2013), a recarga dos aquíferos confinados drenantes, também distinguida como recarga profunda, comumente situa-se entre 1% e 10% da recarga direta ou efetiva. Na região de Belém essa recarga profunda foi estimada em 0,53 m³/s, correspondente a 5% da recarga potencial direta, variável em função da chuva e do coeficiente de infiltração.

No concerne ao balanço hídrico, a equação que descreve as quantidades de água que entram e que são drenadas do aquífero e as variações no armazenamento ao longo do tempo é designada de balanço hidrogeológico e expressa pela equação:

$\Delta S = R - D$
Onde: ΔS = variação no armazenamento;
R = recarga; e D = descarga.

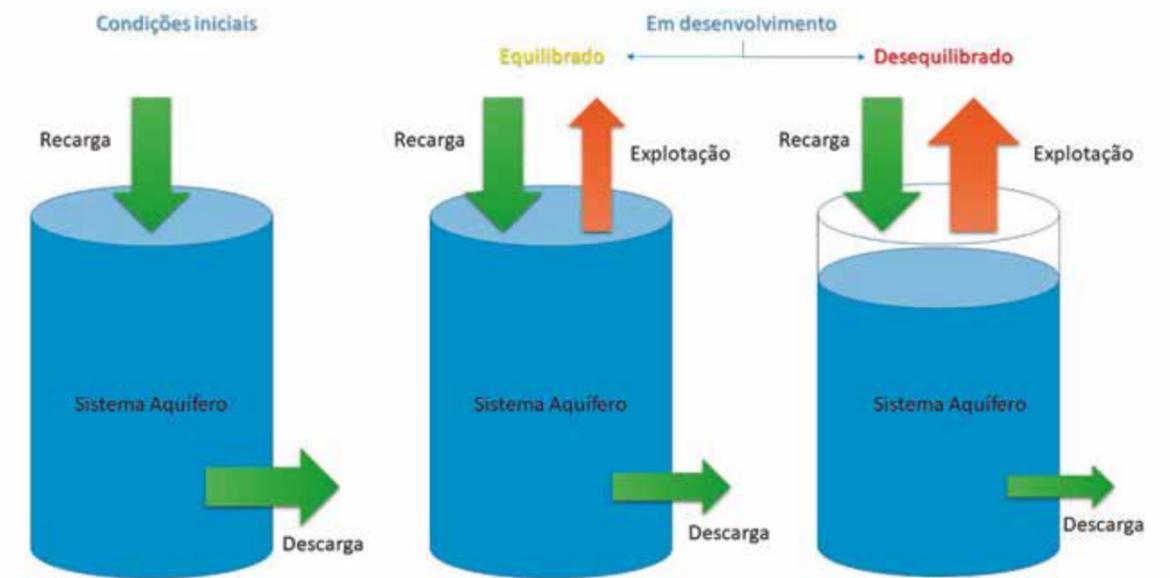
Em condições naturais, as entradas de água no aquífero são decorrentes, principalmente, das precipitações atmosféricas. Obviamente, os influxos de água estão condicionados à natureza dos aquíferos, assim, aquíferos livres recebem águas diretamente das chuvas e, eventualmente, de aquítardos soto-postos. Por outro lado, aquíferos confinados podem receber água dos fluxos descendentes e ascendentes através de aquítardos confinantes, ou diretamente de precipitações nas áreas de afloramento.

As saídas naturais de água dos aquíferos são devidas à evaporação próxima à superfície dos terrenos, no caso de níveis potenciométricos rasos, e às descargas que ocorrem nos corpos hídricos superficiais, referidas como escoamento de base.

À medida em que as águas subterrâneas passam a ser exploradas por meio de poços, principalmente em áreas urbanizadas ou agrícolas irrigadas, dá-se início ao estágio de desenvolvimento do sistema aquífero. No primeiro estágio, denominado de desenvolvimento equilibrado, a extração de água subterrânea induz a um reequilíbrio do sistema aquífero frente às novas condições, as quais são compensadas por incremento na recarga natural ou recarga induzida, e diminuição da descarga natural.

No estágio seguinte, denominado desenvolvimento desequilibrado o incremento das explorações supera a recarga do sistema. Nessa condição, o sistema não consegue mais se reajustar e o desequilíbrio provoca um progressivo esvaziamento do armazenamento do aquífero.

As condições de desenvolvimento desequilibrado podem causar a depleção do aquífero em longo prazo, não sendo, portanto, as condições desejáveis em termos de sustentabilidade.



Para a região de Belém e municípios adjacentes, pode-se admitir que os reservatórios subterrâneos se encontram, atualmente, no estágio de desenvolvimento equilibrado, uma vez que não existem estudos ou monitoramento que tenham registrado diminuição da carga hidráulica dos aquíferos e o total anual das precipitações tem-se mantido bastante elevado ao longo dos anos. A equação de balanço hídrico do sistema aquífero em desenvolvimento equilibrado pressupõe que a variação do armazenamento seja nula entradas de água sejam iguais às saídas. Por se tratar de área urbanizada, considerou-se para este balanço variáveis relacionadas às perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgoto. Em outras palavras:

Modelo esquemático das condições de equilíbrio do balanço hidrogeológico de um sistema aquífero.

$\Delta S = (R + R_r + R_e + R_i) - (D + B_p + B_i + B_o + D_u) = 0$

Resumo do balanço hidrogeológico

Balanço hidrogeológico - 2017					
Recarga			Descarga		
Discriminação	Símbolo	(m³/s)	Discriminação	Símbolo	(m³/s)
Recarga natural média plurianual	R	10,580	Descarga natural média plurianual	D	10,580
Perdas na rede de distribuição	R _r	3,022	Bombeamento abast. público	B _p	5,706
Perdas rede de esgoto (pública + outros) + infiltração de fossas sépticas	R _e	1,316	Bombeamento indústria	B _i	0,607
Recarga induzida (lagos, rios) e fluxo lateral)	R _i	2,414	Bombeamento outros	B _o	0,392
			Escoamento Superficial devido à impermeabilização	D _u	0,047
Total		17,332	Total		17,332
$\Delta S = (R + R_r + R_e + R_i) - (D + B_p + B_i + B_o + D_u) = 0$					

RESERVAS E DISPONIBILIDADES

Em sentido amplo, Custódio & Llamas (1996) definem reserva hídrica subterrânea como a totalidade da água móvel existente em um sistema aquífero. Em outras palavras, compreende a quantidade de água presente somente nas camadas permeáveis do sistema.

A quantidade de água contida nos aquíferos pode ser distinguida em armazenamento drenável e armazenamento compressível (MACE et al., 2001). Os referidos autores conceituaram o armazenamento drenável como a quantidade de água que pode ser drenada do aquífero em função da porosidade efetiva da rocha; e armazenamento compressível como a quantidade de água armazenada devido aos efeitos elásticos resultantes da compressão do próprio arcabouço físico e da água contida nos poros, em função do coeficiente de armazenamento do aquífero.

As reservas subterrâneas são distinguidas em reservas renováveis e reservas permanentes. As reservas renováveis representam a quantidade de água armazenada no aquífero e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico. Correspondem à recarga sazonal dos aquíferos livres, equivalendo ao escoamento de base anual dos rios, estimado em 10,58 m³/s na região de Belém.

As reservas permanentes correspondem ao volume de água acumulado no aquífero, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1996). Num aquífero não confinado compreende o volume de água contido no armazenamento drenável permanente, abaixo no nível de oscilação sazonal.

Já as reservas permanentes de um aquífero confinado abrangem os volumes de água contidos no armazenamento compressível e no armazenamento drenável. Em razão das distintas ordens de grandeza entre o coeficiente de armazenamento e a porosidade efetiva, o armazenamento compressível é muito menor do que o armazenamento drenável.

As reservas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Barreiras foram calculadas considerando a área de ocorrência do aquífero (1893 km²), espessura média (59 m), porosidade efetiva de 20% e cerca de 45% da espessura total composta por sedimentos permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água.



Reservas hídricas subterrâneas Permanentes (Rp) Aquíferos Confinados

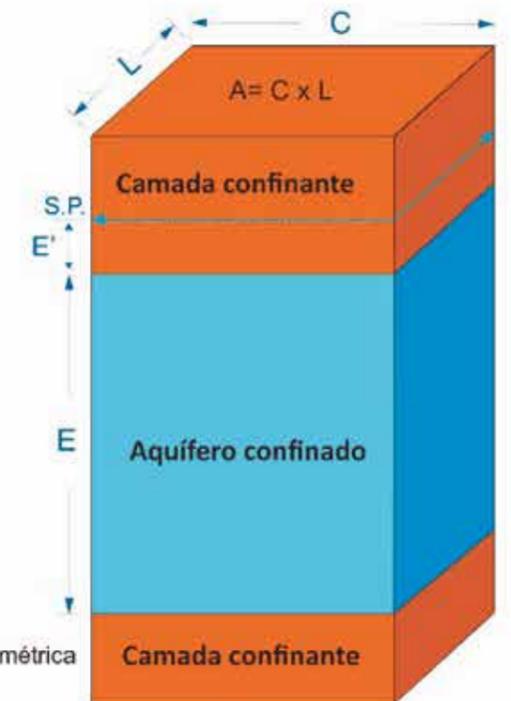
Reserva compressível

$$R_p = A \cdot E' \cdot S$$

Reserva drenável

$$R_p = A \cdot E \cdot \varnothing_e$$

L= largura do aquífero
C= comprimento do aquífero
A= área do aquífero
E= espessura da zona saturada
 \varnothing_e = porosidade efetiva
E'= comprimento do topo do aquífero à superfície potenciométrica
S= coeficiente de armazenamento
S.P.= superfície potenciométrica



Parâmetros utilizados no cálculo das reservas renováveis e permanentes de aquíferos porosos não confinados, considerando-se um sistema em equilíbrio.

Reservas hídricas subterrâneas Renováveis (Rr) e Permanentes (Rp) Aquíferos Livres

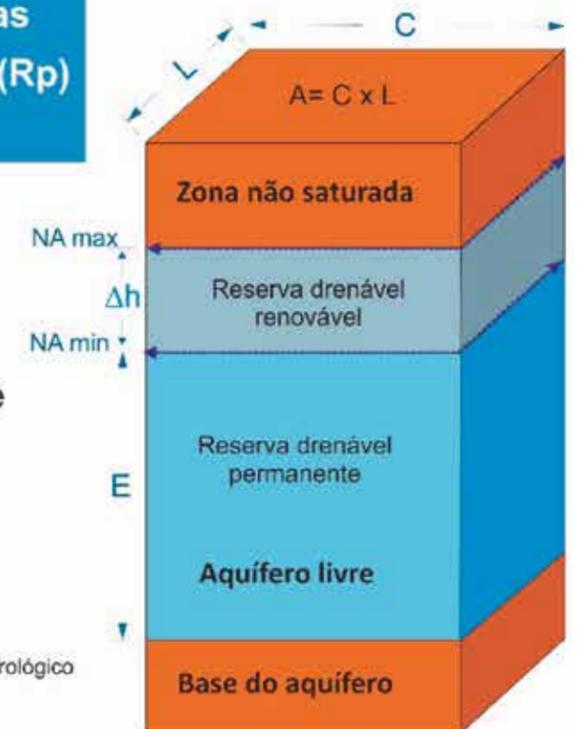
Reserva drenável renovável

$$R_r = A \cdot \Delta h \cdot \varnothing_e \approx E_b$$

Reserva drenável permanente

$$R_p = A \cdot E \cdot \varnothing_e$$

L= largura do aquífero
C= comprimento do aquífero
A= área do aquífero
E= espessura da zona saturada
 \varnothing_e = porosidade efetiva
 Δh = variação do nível de água do aquífero num ciclo hidrológico
NA max= nível de água máximo
NA min= nível de água mínimo



Parâmetros utilizados no cálculo das reservas permanentes de aquíferos porosos confinados.

As reservas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Pirabas foram calculadas considerando a área de ocorrência do aquífero (1893 km²), espessura média (186 m), porosidade efetiva de 20% e cerca de 80% da espessura total composta por sedimentos permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água.

As reservas permanentes compressíveis foram desconsideradas em razão da impossibilidade de se estabelecer a superfície potenciométrica dos aquíferos confinados e semiconfinados desses sistemas.

As reservas hídricas subterrâneas drenáveis, renováveis e totais dos aquíferos terciários da região de Belém foram estimadas em 6,69.E10 m³. O Sistema Aquífero Pirabas armazena 84% de toda reserva hídrica subterrânea da área estudada, enquanto o Barreiras armazena os 16% restantes.

Reservas hídricas subterrâneas dos sistemas aquíferos da região de Belém

Aquíferos	Reserva drenável permanente (m ³)	Reserva renovável (m ³ /ano)	Reservas totais (m ³)
Barreiras	1,01E+10	3,34E+08	1,04E+10
Pirabas	5,65E+10	0	5,65E+10
Total	6,66E+10	3,34E+08	6,69E+10

A disponibilidade hídrica, por sua vez se refere a quantidade de água que pode ser extraída dos aquíferos por tempo indefinido, sem causar consequências ambientais, sociais ou econômicas inaceitáveis. Alley et al. (1999) entendem que a sustentabilidade hídrica subterrânea deve levar em conta o contexto completo do sistema hidrológico, no qual a água subterrânea é parte.

As disponibilidades referentes às reservas renováveis anualmente foram estimadas em 50% dessa vazão. Para avaliação das disponibilidades referentes às reservas permanentes considerou-se 10% das reservas permanentes seriam exploradas em 50 anos. Esse percentual corresponde à retirada de 0,2% ao ano do volume permanente armazenado no aquífero. Assim, as disponibilidades hídricas totais dos aquíferos da região de Belém somam 1,33. E8 m³/ano.

Disponibilidades hídricas dos aquíferos da região de Belém

Aquíferos	Disponibilidades das reservas renováveis		Disponibilidades das reservas permanentes	
	m ³ /ano	km ³ /ano	m ³ /ano	km ³ /ano
Barreiras	1,67E+08	0,17	2,02E+07	0,02
Pirabas	0	0,00	1,13E+08	0,11
Total	1,67E+08	0,17	1,33E+08	0,13

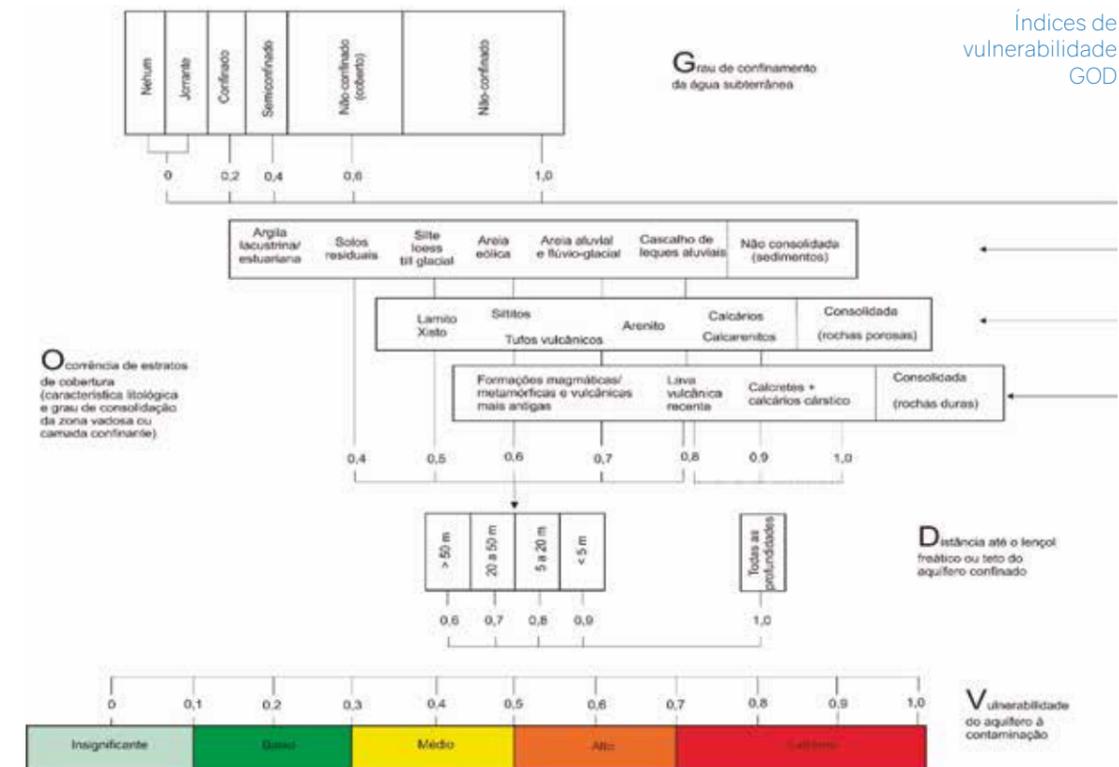
VULNERABILIDADE NATURAL E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO

O reconhecimento de que as águas subterrâneas constituem reserva estratégica e vital para abastecimento das populações suscitou preocupação com a proteção dos aquíferos (FOSTER, 1987).

A vulnerabilidade de um aquífero significa sua maior ou menor susceptibilidade de ser afetado por uma carga poluidora (IG, 1997). Segundo Foster & Hirata (1993), a vulnerabilidade do aquífero é função da inacessibilidade hidráulica da penetração de contaminantes e da capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de sua retenção física e reações químicas com o contaminante.

O método GOD se baseia em metodologia empírica proposta inicialmente por Foster & Hirata (1993) e com modificações posteriores (FOSTER et al., 2006), que leva em consideração parâmetros como ocorrência de água subterrânea (Groundwater occurrence), classificação do aquífero (Overall aquifer class) e profundidade do topo do aquífero (Depth to groundwater table). O produto dos três parâmetros avaliados com base nos valores estabelecidos define o índice de vulnerabilidade, expresso em termos relativos numa escala de 0 a 1, que permite uma classificação em cinco classes: **insignificante, baixa, média, alta e extrema.**



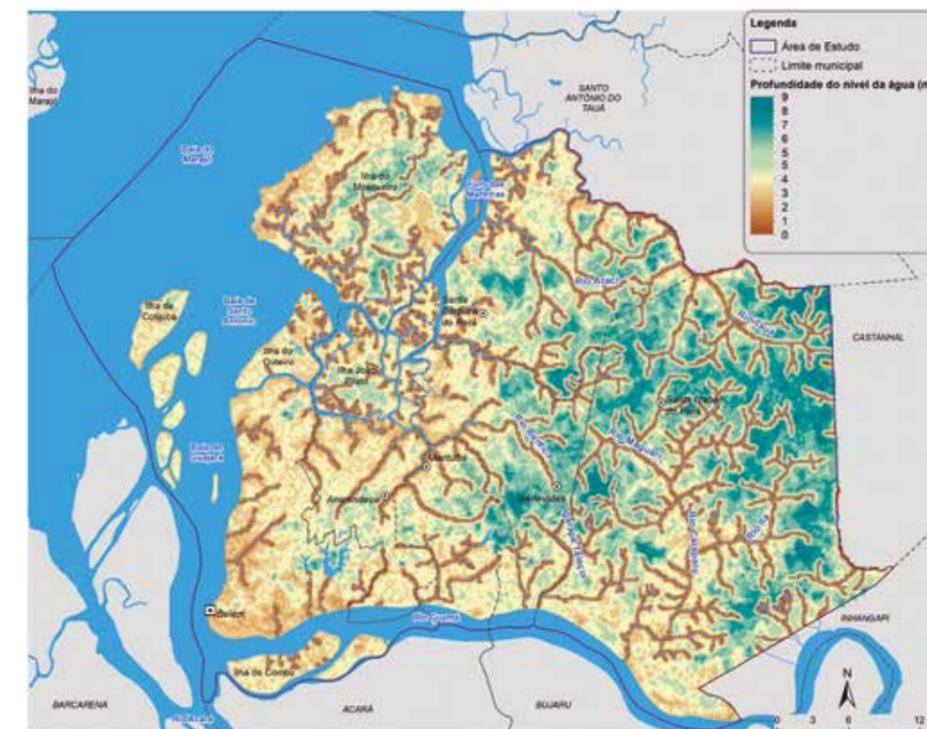


Definição das classes de vulnerabilidade GOD

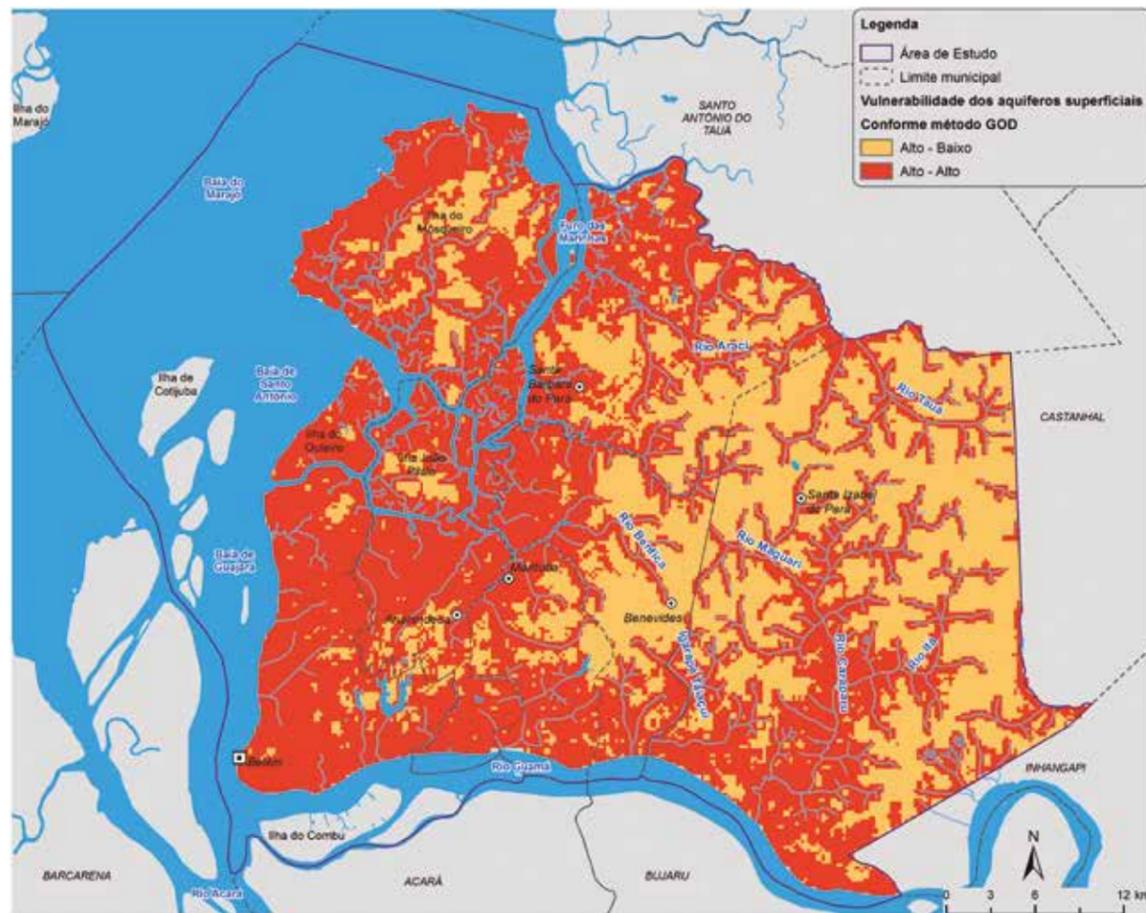
Classe de vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação)

Fonte: Foster et al., 2006

Para os aquíferos aflorantes na área de estudo considerou-se: existência de aquíferos livres nas porções formadas pelas unidades geológicas Pós-Barreiras e Barreiras (índice 0,9); presença de sedimentos arenosos intercalados a sedimentos argilosos, pouco consolidados (índice 0,8); profundidades do nível d'água. Os índices do parâmetro profundidade do nível d'água variam no espaço, enquanto os dois outros parâmetros têm índices que são fixos.



Os resultados apontaram índices de vulnerabilidade entre 0,576 e 0,648, ambos inseridos na classe de vulnerabilidade alta. De modo a obter uma representação gráfica de melhor visualização, considerou-se um desmembramento da classe de vulnerabilidade alta em duas subclasses: Alta-Alta, com índices variando de 0,6 a 0,7; e Alta-Baixa, com índices variando de 0,5 a 0,7.



Vulnerabilidade dos aquíferos superficiais (Sistema Aquífero Barreiras) da área de estudo (método GOD).

Perigo de contaminação pode ser definido como a probabilidade de que a água subterrânea venha a apresentar concentrações de contaminantes superiores aos valores estabelecidos pela OMS (Organização Mundial da Saúde) para a qualidade da água potável. É determinado pela interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante que é, será ou pode ser aplicada no meio em decorrência de atividades urbanas, industriais, agrícolas, de mineração e outras de natureza antrópica (FOSTER et al., 2006).

A contaminação dos aquíferos ocorre nos locais em que carga contaminante disposta no terreno excede a capacidade de atenuação natural dos solos. Em termos práticos, a avaliação do perigo de contaminação envolve a sobreposição dos mapas de vulnerabilidade do aquífero e de riscos de contaminação.

Segundo Foster et al. (2006), avaliação do perigo de contaminação dos aquíferos tem como objetivo definir ações preventivas e corretivas para proteção da qualidade da água subterrânea.

A maior preocupação com a contaminação da água subterrânea se concentra principalmente nos aquíferos livres, especialmente nas áreas em que a zona vadosa é pouco espessa e o nível de água é raso, como é o caso da região de Belém. Foster et al. (2006) alertam, todavia, que em pontos em que o aquífero é semiconfinado e os aquíferos são relativamente pouco espessos, também há riscos significativos de poluição.

Para elaboração do mapa de perigo de contaminação, inicialmente foram cadastrados 2.146 empreendimentos potencialmente poluentes na região de Belém.

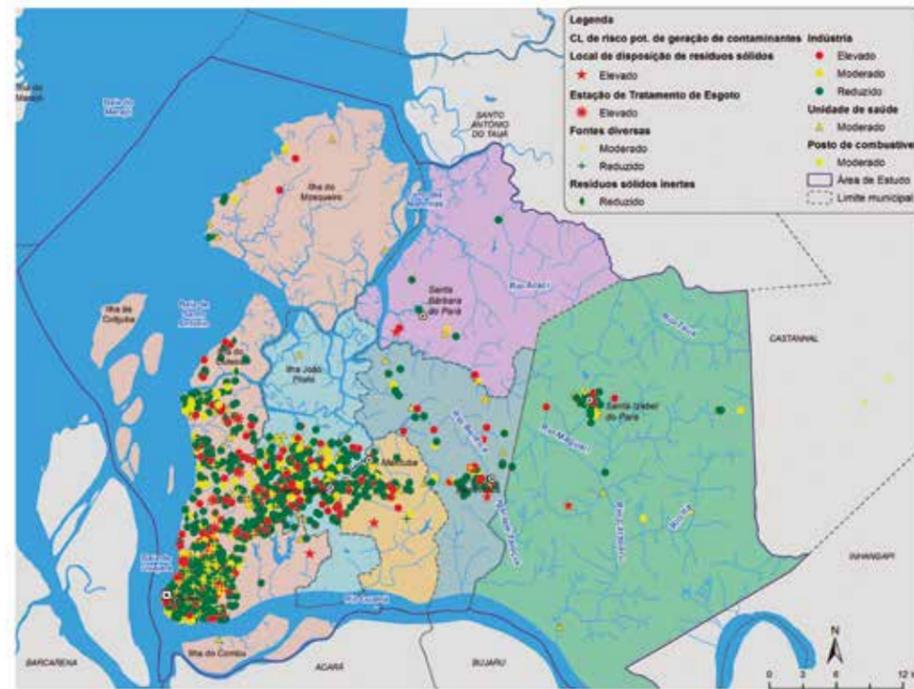
Empreendimentos potencialmente poluentes cadastrados

Código	Empreendimentos
Nº	Empreendimentos
8	Estações de tratamento de efluentes (ETEs) obtidas no "Atlas de Despoluição", disponibilizado por ANA (2017)
368	Postos de combustível obtidos do cadastro da ANP
236	Unidades de saúde (hospitais, laboratórios, clínicas, etc.)
1377	Indústrias listadas no do Guia Industrial do Pará
73	Geradores de resíduos sólidos inertes obtidos do cadastro de Grandes Geradores de Resíduos Sólidos disponibilizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMA) de Belém
78	Empreendimentos diversos (cemitérios, lava-jatos, oficinas, etc.) obtidos de levantamentos executados pela PROFILL Engenharia e Ambiente Ltda.
6	Empreendimentos geradores de resíduos sólidos (lixões, aterros, etc.), obtidos de cadastro da SEMAS

As fontes potenciais pontuais de contaminação foram classificadas quanto ao grau de risco em função do impacto da atividade econômica, de acordo com o método POSH (Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically), em três níveis qualitativos: reduzido, moderado e elevado.

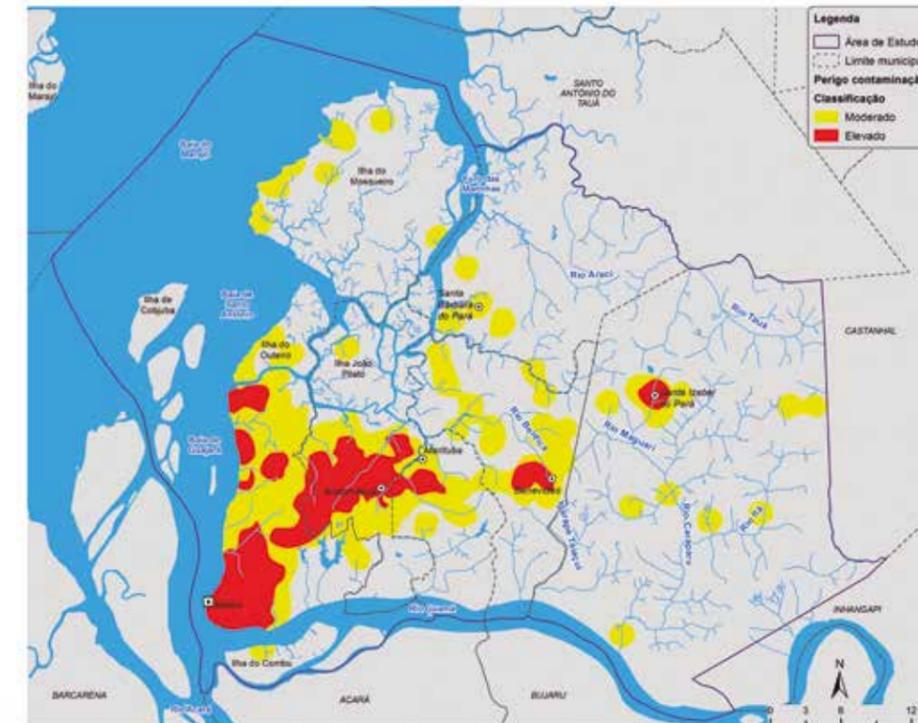
Potencial de gerar carga contaminante no subsolo	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	Disposição de resíduos sólidos	Áreas industriais	Lagoas de águas residuais	Outras (urbanas)	Mineração e exploração de petróleo
Elevado	Resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	Indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/de produtos químicos perigosos	Todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial se a área >5 hectares)		Operações em campo de petróleo, mineração de metais
Moderado	Chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	Indústria tipo 2	Esgoto residencial se a área >5 hectares, demais casos não relacionados acima ou abaixo	Postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	Algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	Chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1	Indústria tipo 1	Águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	Cemitérios	
Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos					
Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão					
Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal					

Distribuição dos empreendimentos de acordo com as classes de risco potencial de geração de contaminantes.



Classificação do perigo de contaminação em função da vulnerabilidade natural dos aquíferos e do risco potencial de contaminação

Índice de vulnerabilidade natural	Potencial de contaminação		
	Elevado	Moderado	Reduzido
Extremo	Extremo	Alto	Moderado
Alto	Alto	Alto	Moderado
Médio	Alto	Moderado	Baixo
Baixo	Moderado	Baixo	Muito baixo

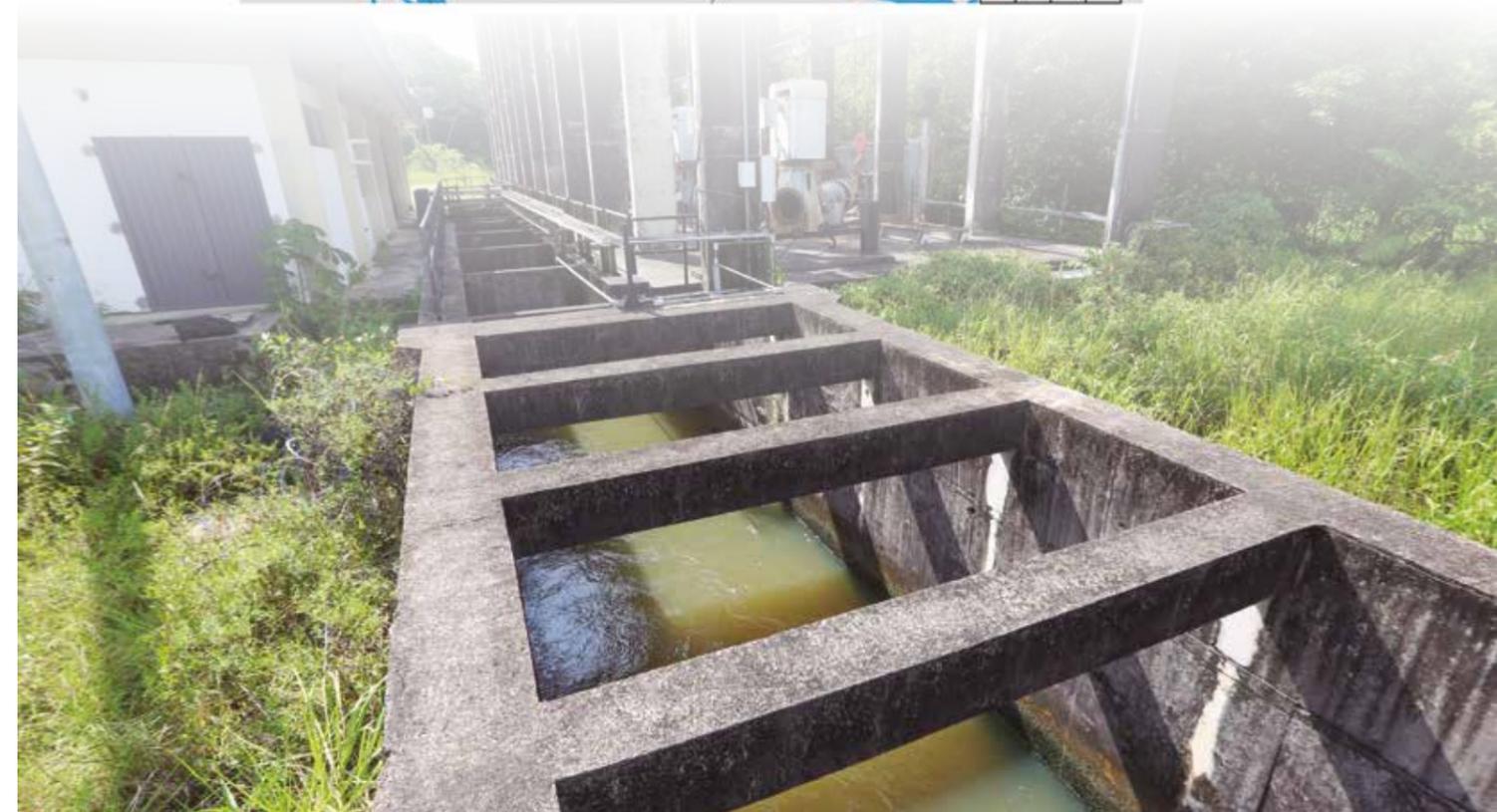
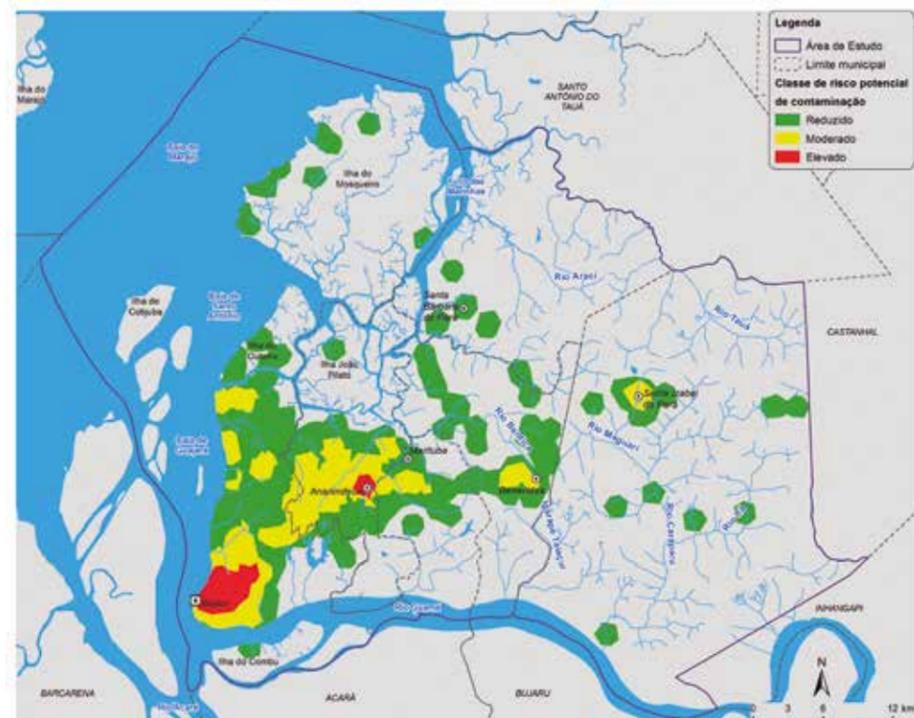


Distribuição das classes de perigo de contaminação na área de estudo

Em seguida, foi elaborado o mapa de risco potencial de geração de contaminantes com base na quantidade de empreendimentos por km² (densidade de empreendimentos) e no grau de risco potencial determinado pela classificação POSH.

Finalmente, foram cruzados os mapas de vulnerabilidade e de risco potencial de geração de contaminantes para geração do mapa de perigo de contaminação. Foram determinadas duas classes de perigo de contaminação, moderada e alta, associadas às áreas intensamente urbanizadas.

Classificação das áreas com base no risco potencial de geração de contaminantes





5

ESTRATÉGIA

DE GESTÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DA
REGIÃO DE BELÉM/PA

SUBSÍDIOS TÉCNICOS PARA O APROVEITAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A exploração de águas subterrâneas para abastecimento público é normalmente realizada por meio da perfuração de poços tubulares, que são estruturas especialmente projetadas para acessar e retirar quantidades econômicas de água dos aquíferos. Os poços tubulares são construídos com máquinas perfuratrizes e caracterizam-se pelos diâmetros relativamente pequenos comparados às suas profundidades.

Os poços tubulares podem ser informalmente classificados como rasos (profundidades de até 50 m) ou profundos (profundidades maiores do que 50 m). Poços perfurados em aquíferos confinados podem ainda ser distinguidos entre jorrantes (quando água jorra naturalmente na superfície do terreno) e não jorrantes (quando o nível de água encontra-se acima do topo do aquífero, mas não alcança a superfície do terreno).

Como toda obra de engenharia, a construção de poços tubulares deve ser precedida de estudo hidrogeológico que norteará a elaboração de um projeto técnico de perfuração. O projeto deve atender às normas técnicas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e ter como responsável técnico um profissional, uma empresa ou uma instituição habilitada perante o CREA, para a sua execução.

O projeto de poço compreende um conjunto de diretrizes técnicas previamente planejadas, adequadas às condições hidrogeológicas do terreno e demanda requerida. Deve combinar materiais de qualidade, ótimo desempenho, longa duração e custo razoável. A vantagem de se dispor de um projeto básico é equalizar cotações dos proponentes e evitar erros construtivos em decorrência do emprego de materiais e serviços de baixa qualidade.

A despeito da intensificação crescente do uso, da legislação vigente de recursos hídricos e da existência de normas técnicas consolidadas, a maioria das perfurações de poços, particulares ou públicos, ainda é executada sem um projeto básico e sem adequação aos requisitos técnico mínimos necessários para garantir uma boa construção.

Exemplos de desconformidades encontradas em poços cadastrados na região de Belém.



A proliferação de poços mal construídos deve-se à vários fatores que, isolados ou combinados, desempenham papel decisivo para a manutenção do estado atual de desatendimento às leis, normas e diretrizes para captação de água subterrânea. Entre esses fatores condicionantes podem ser citados:

- Negligência ou desconhecimento das normas técnicas vigentes de construção de poços por parte dos usuários;
- Contratação de empresas ou pessoas não habilitadas para a perfuração dos poços;
- Insuficiência de fiscalização;
- Problemas econômicos enfrentados pela população, principalmente a de baixa renda, que contrata serviços inadequados por conta dos custos mais baixos;
- Insuficiência do serviço público de abastecimento;

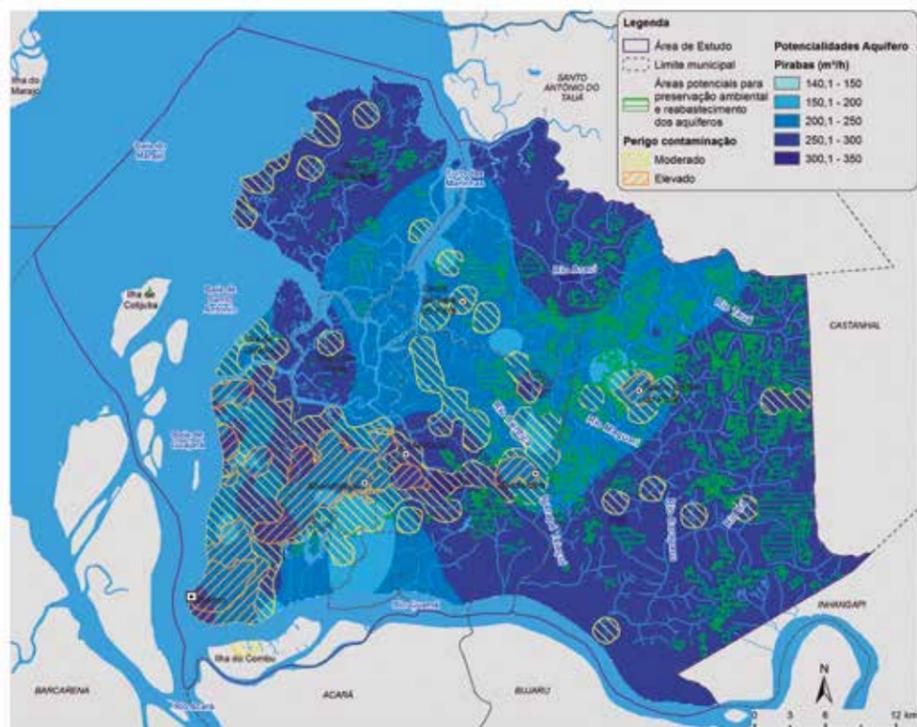
ZONEAMENTO DA EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

De modo a distinguir áreas com maiores vazões potenciais e melhores características hidroquímicas, foram elaborados mapas de zoneamento da exploração das águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras e Pirabas, com o objetivo orientar o órgão gestor estadual nas análises de solicitações de outorga de uso das águas subterrâneas e na avaliação de áreas para instalação de sistemas de captação.

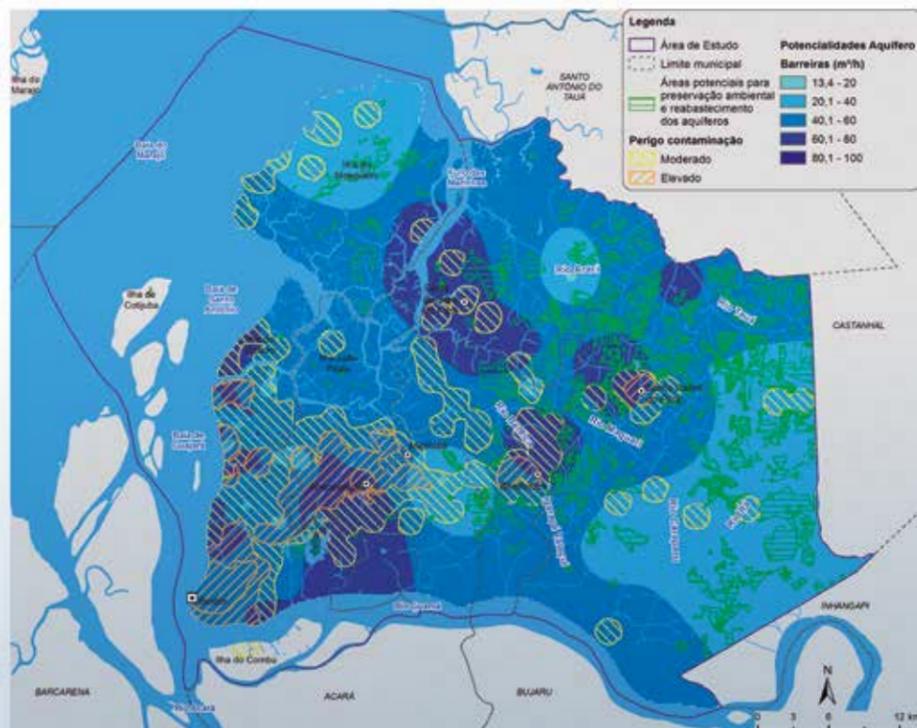
Os mapas de zoneamento da exploração compreendem a integração dos mapas de potencialidades dos aquíferos Pirabas e Barreiras, do mapa de perigo de contaminação e do mapa das áreas de proteção da zona de recarga. Esses mapas permitem ao gestor uma avaliação rápida com relação às vazões potenciais de extração dos aquíferos e às potenciais interferências antrópicas que afetam a qualidade das águas subterrâneas.



Zoneamento da exploração no Sistema Aquífero Pirabas.



Zoneamento da exploração no Sistema Aquífero Barreiras.





PLANO
DE GESTÃO
DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS

O plano de gestão das águas subterrâneas da região de Belém foi estruturado em cinco componentes.



Plano de Gestão para as águas subterrâneas da região de Belém.

COMPONENTE 1: PLANEJAMENTO E GESTÃO

- Proposta de divisão em Unidades de Gestão
- Complementação e aperfeiçoamento da legislação vigente e diretrizes para os instrumentos de gestão
- Articulação com Planos e Projetos Setoriais

COMPONENTE 2: FORTALECIMENTO INSTITUCIONAL

- Arranjo e Fortalecimento Institucional
- Aperfeiçoamento do Quadro Técnico

COMPONENTE 3: MONITORAMENTO

- Proposta de Rede de Monitoramento
- Plano de Monitoramento

COMPONENTE 4: PROTEÇÃO E CONSERVAÇÃO

- Indicação de Áreas de Proteção das Zonas de Recarga
- Indicação de Áreas de Restrição e Controle

COMPONENTE 5: INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS

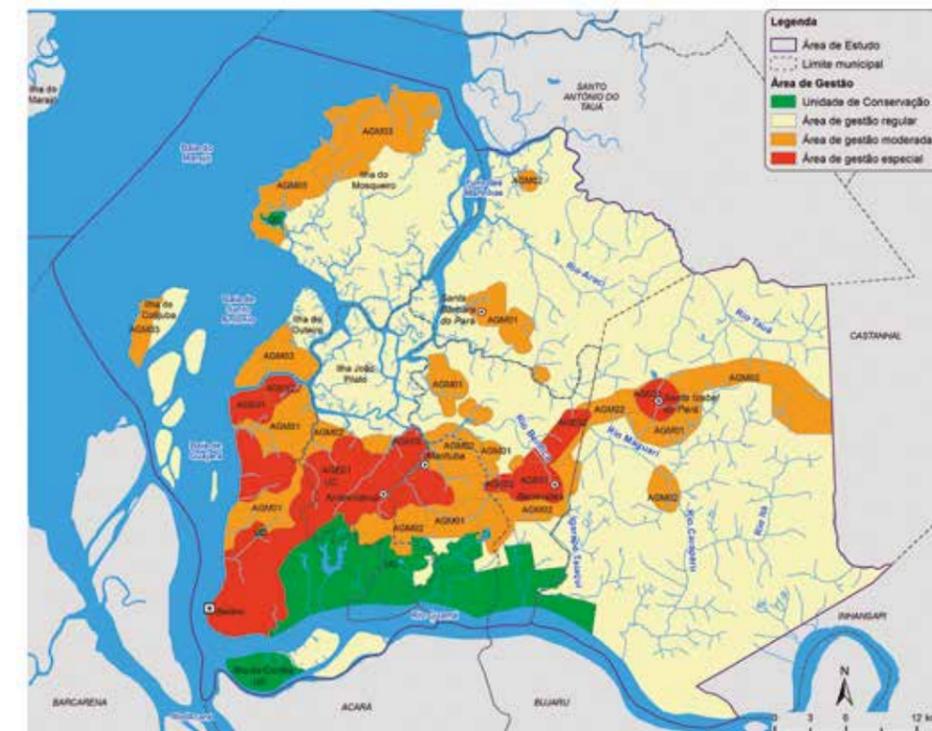
- Diretrizes para o setor de infraestrutura e saneamento
- Alternativas de incremento de água para abastecimento público
- Perímetro de proteção dos poços para abastecimento público
- Indicação de poços abandonados e/ou desativados

**COMPONENTE 1:
PLANEJAMENTO E GESTÃO**

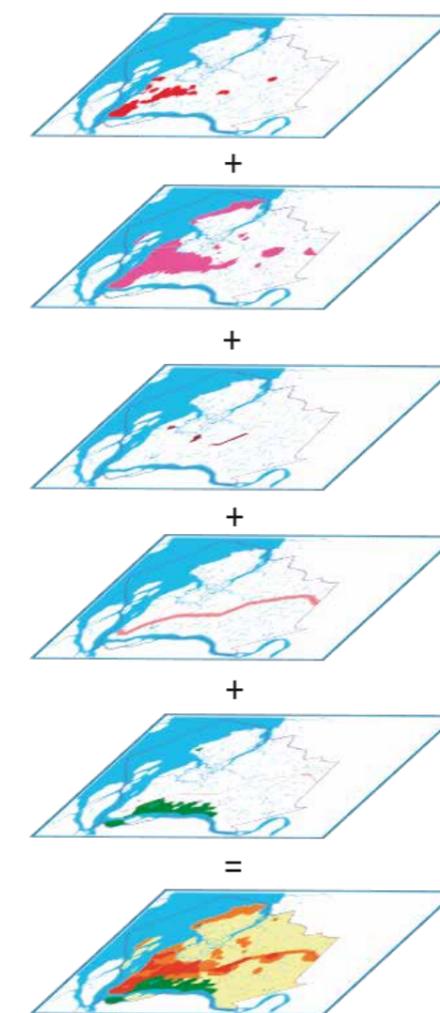
Proposta de divisão em Unidades de Gestão

A proposta de divisão da área em unidades de gestão foi baseada, principalmente, na questão da qualidade das águas subterrâneas. Além disso, a proposta de divisão representa total coerência com o tipo de ordenação territorial dos municípios, pois considera as áreas de maior adensamento urbano populacional, uma vez que considerou as áreas urbanas, de expansão urbana e de potencial uso industrial dos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano – PDDUs municipais.

As unidades de gestão foram subdivididas e numeradas de acordo com características territoriais homogêneas verificadas em cada PDDU. Para cada unidade de gestão são definidas as diretrizes para a gestão das águas subterrâneas.



Proposta de divisão em unidades de gestão



Alto Perigo de Contaminação

Zonas Urbanas e de Expansão Urbana (PDDUs)

Zonas Industriais (PDDUs)

BR-316 e entorno (buffer de 1 km)

Unidades de Conservação

Unidades de Gestão

Características das unidades de gestão da região de Belém

Código	Unidade de Gestão	Características
AGE01	Área de Gestão Especial – Urbana	São áreas classificadas como de “alto” perigo de contaminação, pois possui presença significativa e adensamento de poços, postos de combustíveis e fontes potenciais de contaminação. São áreas urbanas consolidadas de uso predominantemente residencial, ocupação de atividades econômicas, presença de núcleos industriais e comerciais. Há grande número de terrenos ocupados com verticalização e alta densidade populacional. Apresenta infraestrutura consolidada sendo que algumas áreas estão em processo de renovação urbana. O esgotamento sanitário pode existir, mas ainda é precário.
AGE02	Área de Gestão Especial – Industrial	Não estão enquadradas, necessariamente, em áreas de “alto” perigo de contaminação, mas apresentam potencial de impacto ambiental significativo, uma vez que são áreas potenciais para o uso industrial ou com uso industrial já consolidado segundo os PDDUs. Englobam ainda os eixos de comércio e serviços, e aquelas que apresentam forte dinâmica, gerada por novas centralidades comerciais, de serviços, e seus entornos, cujo objetivo é o fomento à dinamização econômica.
AGM01	Área de Gestão Moderada – Urbana	Diferentemente da AGE01, são áreas que encontram-se fora da classe de “alto” perigo de contaminação, pois possui presença de poços e fontes potenciais de contaminação dispersas. Mas, assim como a AGE01, são áreas urbanas consolidadas de uso predominantemente residencial, ocupação de atividades econômicas, presença de núcleos industriais e comerciais. A densidade populacional é menor do que aquela verificada nas AGE01. Apresenta infraestrutura consolidada sendo que algumas áreas estão em processo de renovação urbana. O esgotamento sanitário pode existir, mas ainda é precário.



Código	Unidade de Gestão	Características
AGM02	Área de Gestão Moderada – Expansão Urbana	Diferentemente da AGE01, são áreas que encontram-se fora da classe de “alto” perigo de contaminação, pois possui presença de poços e fontes potenciais de contaminação dispersas. Além disso, são áreas em processo de consolidação ou passíveis de serem urbanizadas segundo os PDDUs. Predomina o uso residencial, com algumas atividades econômicas dispersas, presença de pequenos núcleos industriais e comerciais. Apresenta infraestrutura consolidada e equipamentos públicos em parte da área e inexistente em outra. Inexistência de esgotamento sanitário. Pode haver terrenos subutilizados ou não utilizados e ocupações precárias.
AGM03	Área de Gestão Moderada – Urbanização Rarefeita/ Sazonal	Diferentemente da AGE01, são áreas que encontram-se fora da classe de “alto” perigo de contaminação, pois possui presença de poços e fontes potenciais de contaminação dispersas. Englobam as áreas urbanas com ocupação rarefeita e/ou núcleos urbanos com utilização sazonal segundo os PDDUs, ocupados predominantemente nos finais de semana e férias. Apresenta infraestrutura consolidada e equipamentos públicos em parte da área e inexistente em outra. Possui presença significativa de vegetação nativa remanescente.
AGR	Área de Gestão Regular	Englobam as áreas dos municípios sem formação de núcleos urbanos. São áreas dotadas ou não de potencial turístico segundo os PDDUs. Presença de nascentes e cursos e corpos d’água estruturadores das bacias hidrográficas, presença significativa de vegetação nativa remanescente. Ecossistemas preservados. Não possuem presença de poços e fontes potenciais de contaminação.



Diretrizes para as águas subterrâneas nas unidades de gestão da região de Belém

Código	Unidade de Gestão	Obrigações Usuário	Diretrizes gerais de gestão por parte do órgão gestor
AGE01	Área de Gestão Especial – Urbana	<ul style="list-style-type: none"> Adequar-se às condições impostas pelo processo de outorga; Executar a obra civil de poço tubular de acordo às normas construtivas vigentes; Poços tubulares com extrações de mais de 200m³/dia devem contar com monitoramento de nível mensal (medido ao final do período de repouso) e análise química anual (com laudo assinado por profissional habilitado). 	<ul style="list-style-type: none"> Exigir, receber e manter banco de dados de níveis históricos e análise química dos poços monitorados pelos usuários; Realizar o monitoramento quali-quantitativo; Fazer valer a restrição de uso nos perímetros de proteção dos poços para abastecimento público.
AGE02	Área de Gestão Especial – Industrial	<ul style="list-style-type: none"> Adequar-se às condições impostas pelo processo de outorga; Executar a obra civil de poço tubular de acordo às normas construtivas vigentes; Poços tubulares de uso industrial devem contar com monitoramento de nível mensal (medido ao final do período de repouso) e análise química anual (com laudo assinado por profissional habilitado). 	<ul style="list-style-type: none"> Exigir, receber e manter banco de dados de níveis históricos e análise química dos poços monitorados pelos usuários; Realizar o monitoramento quali-quantitativo; Fazer valer a restrição de uso nos perímetros de proteção dos poços para abastecimento público.
AGM01	Área de Gestão Moderada – Urbanização Consolidada	<ul style="list-style-type: none"> Adequar-se às condições impostas pelo processo de outorga; Executar a obra civil de poço tubular de acordo às normas construtivas vigentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Fazer valer a restrição de uso nos perímetros de proteção dos poços para abastecimento público.
AGM02	Área de Gestão Moderada – Expansão Urbana	<ul style="list-style-type: none"> Adequar-se às condições impostas pelo processo de outorga; Executar a obra civil de poço tubular de acordo às normas construtivas vigentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Fazer valer a restrição de uso nos perímetros de proteção dos poços para abastecimento público.
AGM03	Área de Gestão Moderada – Urbanização Rarefeita/ Sazonal	Idem AGM02	Idem AGM02
AGR	Área de Gestão Regular	Idem AGM02	Idem AGM02

Complementação e aperfeiçoamento da legislação vigente e diretrizes para os instrumentos de gestão

Os principais instrumentos de gestão trazidos à tona pela Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Pará (Lei nº 6.381/2001) e uma avaliação sintetizada quanto a sua existência, execução e diretrizes para o seu aprimoramento são apresentadas a seguir:

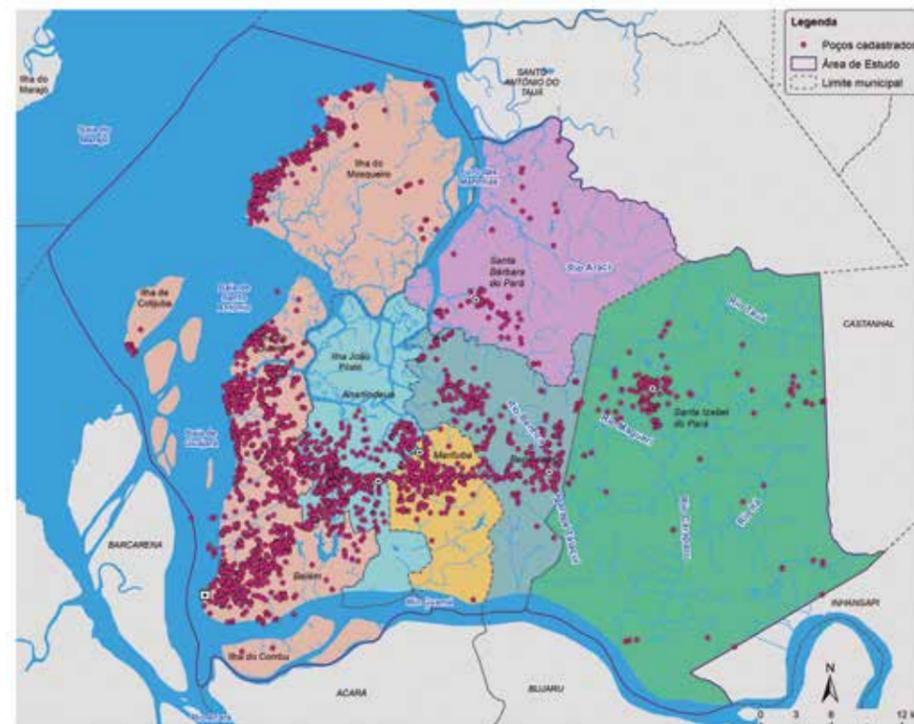
I – PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS	
Situação Atual	Diretrizes
O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Pará foi contratado em 2018 pela SEMAS em parceria com a Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental (SRHQ) do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e está em elaboração. Em relação aos Planos de Bacias não há Plano contrato ou em elaboração, uma vez que nenhum bacia do Estado possui Comitê instituído.	É fundamental que os Planos de Recursos Hídricos, à medida em que forem elaborados, incorporem todas as informações e metodologias utilizadas no presente estudo e que este possa servir de amálgama entre políticas locais e regionais, ambientais e específicas de recursos hídricos.

II – ENQUADRAMENTO DOS CORPOS D' ÁGUA	
Situação Atual	Diretrizes
<p>No Estado do Pará, ainda não há exemplos de enquadramento dos corpos de água de nenhuma bacia hidrográfica.</p> <p>Para o enquadramento das águas subterrâneas, o Art. 6º da Resolução CONAMA nº 396/2008, estabelece que os padrões das Classes 1 a 4 deverão ser estabelecidos com base nos Valores de Referência de Qualidade-VRQ, que deverão ser determinados pelos órgãos competentes, e nos Valores Máximos Permitidos para cada uso preponderante, observados os Limites de Quantificação Praticáveis-LQPs apresentados no Anexo I da mesma Resolução.</p> <p>Conforme o Art. 12º da Resolução CONAMA nº 396/2008, os parâmetros a serem selecionados para subsidiar a proposta de enquadramento das águas subterrâneas em classes deverão ser escolhidos em função dos usos preponderantes, das características hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, das fontes de poluição e outros critérios técnicos definidos pelo órgão competente.</p>	<p>Faz-se necessário conhecer o “background” de cada um dos parâmetros para subsidiar a proposta de enquadramento das águas subterrâneas em classes, estabelecendo o espectro de variação natural dos mesmos no tempo e no espaço, definindo-se os Valores de Referência de Qualidade – VRQ. Baseado nesta análise é que se pode afirmar, com mais certeza, quando um determinado corpo hídrico se encontra contaminado por razões antrópicas.</p> <p>Os resultados das análises hidrogeoquímicas realizadas em ambas as campanhas de amostragem deste estudo fornecem subsídios para a seleção dos parâmetros de enquadramento e para a definição dos respectivos VRQs pelo órgão competente.</p> <p>Os resultados apontam para a classificação hidroquímica das águas subterrâneas dos dois sistemas aquíferos da região, assim como determinaram alguns elementos relacionados à contaminação antrópica, especialmente relacionada a carência de saneamento básico.</p>

III – OUTORGA DOS DIREITOS DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS	
Situação Atual	Diretrizes
<p>Encontra-se em desenvolvimento o Sistema de Gestão de Recursos Hídricos (SIGERH-PA) da SEMAS, um conjunto de soluções sistêmicas eletrônicas, baseadas em conhecimento de gestão de recursos hídricos e informações hidrológicas, hidrometeorológicas e hidrogeológicas consolidadas, com ênfase na modernização geral dos procedimentos que envolvem desde as fases iniciais, de protocolo de processos e recepção de documentos, passando por todas as fases de análise, até a expedição dos atos autorizativos de uso de recursos hídricos.</p> <p>No Sistema, já é possível solicitar de forma online a Declaração de Dispensa de Outorga para captação (unifamiliares) de água subterrânea. Em breve, será possível fazer solicitações de outras tipologias e modalidades.</p>	<p>Verificou-se através do cadastramento de campo que o número de usuários regularizados ainda é pequeno considerando-se as dimensões da área de estudo. Um dos gargalos encontrados é a ausência de fiscalização das captações e lançamentos e a falta de conhecimento dos usuários de água sobre a necessidade e a importância da regularização.</p> <p>Se faz necessário, portanto, que sejam realizadas campanhas de cadastramento de usuários e regularização da outorga, de forma a gerar um banco de usuários consistente para ser utilizado no planejamento e gestão dos recursos hídricos, tanto na área de estudo, como no Estado do Pará.</p> <p>Em relação ao SIGERH-PA, sugere-se que o banco de dados deste trabalho, com destaque para as informações relacionadas ao perigo de contaminação, densidade de fontes poluidoras, sejam incorporadas ao Sistema. Além disso, há a necessidade de se estabelecer um controle e fiscalização sobre os processos autodeclaratórios.</p>

IV – COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS	
Situação Atual	Diretrizes
<p>O instrumento de cobrança pelo uso da água e o instrumento de compensação aos municípios ainda não foram implementados no Estado do Pará e nem regulamentados pelo Conselho Estadual.</p> <p>A bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas (afluente do Rio Tocantins), no entanto, apresenta um projeto piloto de implementação da cobrança, contratado pelo Núcleo de Gerenciamento do Programa Pará Rural – NPGR com o objetivo de estabelecer critérios e condições que possibilitem a implantação do instrumento.</p> <p>Um entrave para a implementação da cobrança pelo uso da água no Estado do Pará é a Taxa de Controle, Acompanhamento e Fiscalização das Atividades de Exploração e Aproveitamento de Recursos Hídricos (TFRH). Trata-se de uma taxa de fiscalização das atividades de exploração e aproveitamento de recursos hídricos e não representa a cobrança pelo uso da água.</p>	<p>Necessidade de um sistema de informações com uma base de dados única e eficiente, compartilhada com o sistema federal, reunindo dados cadastrais de usuários de recursos hídricos do Estado.</p> <p>Necessidade de aperfeiçoamento do instrumento de outorga e necessidade de conhecimento do universo de usuários antes da implementação da cobrança.</p>

Todos os 3.434 poços levantados ao longo do projeto.



VI – SISTEMA ESTADUAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SEIRH)	
Situação Atual	Diretrizes
<p>Está previsto pela SEMAS, a substituição do SEIRH pelo SIGERH-PA. No entanto, são apontadas algumas melhorias que poderiam ser realizadas no SEIRH ou, futuramente no SIGERH-PA, para que o Sistema a ser utilizado atenda plenamente os objetivos e princípios básicos previstos na Resolução CERH Nº 12/2010, ou seja, ser um site informativo para os usuários de água e a sociedade civil em geral.</p>	<p>No que se refere às informações sobre capacitação, por exemplo, sugere-se que sejam divulgados os eventos e as datas das campanhas de educação ambiental, cursos de capacitação e seminários realizadas pelas SEMAS.</p> <p>As informações do Conselho Estadual devem ser amplamente divulgadas, com disponibilização ao público das datas e horários das plenárias, composição atual, atas de reuniões, resoluções aprovadas, atividades das câmaras técnicas, e etc.</p> <p>Na parte de mapas interativos sugere-se a reestruturação, uma vez que não estão disponíveis, por exemplo, informações sobre os usuários outorgados no Estado. É fundamental que as informações no SEIRH ou, futuramente no SIGERH-PA, sejam constantemente atualizadas e que o Sistema contemple um banco de dados sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos do Estado do Pará de fácil acesso e disseminação.</p>

VII - CAPACITAÇÃO, DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL	
Situação Atual	Diretrizes
<p>A SEMAS possui ações de educação ambiental iniciadas, mas com amplo potencial de desenvolvimento complementar. Na área de recursos hídricos, a SEMAS realizou em 2015, campanhas de conscientização sobre a importância da regularização do uso da água em condomínios residenciais em Belém e região metropolitana. Ações desse tipo devem ser continuada e ampliada para outros setores usuários.</p> <p>Em relação à cursos de capacitação e seminários, as maiores dificuldades estão relacionadas à logística para a execução em municípios das regiões mais remotas e de difícil acesso do Estado, além da baixa adesão das prefeituras.</p>	<p>Propõe-se a criação de cursos de educação a distância (EAD) e seminários online, que devem ser acompanhados por intensa divulgação juntos aos atores principais. Os cursos de capacitação devem ter como público alvo principal os técnicos das SEMAS municipais para atuação na área de recursos hídricos nos municípios.</p> <p>Promover uma maior articulação entre as Diretorias existentes (DIREH e Diretoria de Educação Ambiental) e um aperfeiçoamento do quadro técnico na área de recursos hídricos.</p>

Articulação com planos e projetos setoriais

É primordial a integração das informações deste estudo e a articulação entre os atores envolvidos direta e indiretamente na gestão de recursos hídricos deve ocorrer na ordem técnica e na ordem institucional/política.



Sugere-se que o banco de dados deste estudo seja compartilhado com todos os atores estratégicos e que seja utilizado por outros instrumentos de planejamento setorial. Para a elaboração dos próximos planos (saneamento, ordenamento territorial, zoneamentos, etc.) deve-se considerar as potencialidades e fragilidades das águas subterrâneas identificadas neste estudo, assim como nas revisões dos Planos Diretores, que definem o zoneamento, áreas de expansão, áreas de proteção ambiental.

Na ordem institucional / política a Câmara Técnica de Águas Subterrâneas no CERH-PA, proposta na sequência, será um ente chave para a questão da gestão integrada na região de estudo, na medida em que poderá promover a articulação do planejamento de recursos hídricos com os demais planejamentos, incluindo o Estado e os municípios, assim como os setoriais.

COMPONENTE 2: FORTALECIMENTO INSTITUCIONAL

Proposta de arranjo e fortalecimento institucional

CERH-PA

Propõe-se a criação de uma Câmara Técnica sobre Águas Subterrâneas no CERH-PA.

Esta Câmara Técnica terá como competências discutir e propor a inserção da gestão de águas subterrâneas na Política Estadual de Recursos Hídricos; compatibilizar as legislações relativas a exploração e a utilização destes recursos; propor mecanismos institucionais de integração da gestão das águas superficiais e subterrâneas; propor mecanismos institucionais de integração da gestão das águas subterrâneas com o planejamento setorial; analisar, estudar e emitir pareceres sobre assuntos afins; propor mecanismos de proteção e gerenciamento das águas subterrâneas; propor ações mitigadoras e compensatórias; e analisar e propor ações visando minimizar ou solucionar eventuais conflitos.

SEMAS/DIREH

A SEMAS é o órgão ambiental do Estado do Pará. Na SEMAS, o planejamento e a gestão de recursos hídricos é realizado através da Diretoria de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (DIREH). Uma vez que a gestão ambiental e a gestão de recursos hídricos constituem a mesma secretaria (SEMAS), sugere-se que as ações voltadas à capacitação, educação ambiental e fiscalização sejam executadas por equipe técnica dedicada para essas atividades.

Nos processos de análises dos pleitos de outorga sugere-se um **fortalecimento institucional entre Belém e as regionais visando a descentralização dos pedidos de outorgas**. O SIGERH-PA pode vir a facilitar esse processo de descentralização. Para isso, todos os técnicos, tanto de Belém, como das regionais, devem ter acesso ao sistema e estarem aptos a operá-lo.

COMITÊS DE BACIA

O CERH-PA aprovou a criação do Comitê de Bacia do Rio Marapanim, mas sua institucionalização ainda necessita ser oficializada por Decreto do Gover-

no do Estado do Pará. O Comitê de Bacia do Rio Marapanim é o único Comitê de Bacia no Estado do Pará, cujo processo de criação está mais avançado. Segundo representantes do Movimento, a discussão sobre a institucionalização do Comitê já dura onze anos. O Movimento da Bacia do Rio Marapanim é exemplo de engajamento e interesse por parte da sociedade civil organizada e usuários de água, a ser seguido pelas demais bacias hidrográficas do Estado do Pará.

Proposta de aperfeiçoamento do quadro técnico

Propõe-se o **desenvolvimento de um plano de capacitação** consistente, o qual defina não somente os atores participantes (incluindo a sociedade civil e os usuários de água), como também os eixos temáticos, além da metodologia básica de capacitação e, finalmente, os elementos de infraestrutura necessários à sua concretização. Faz-se necessário que este Plano estabeleça regras mínimas para a participação e sistemática espacial, levando em consideração as diferenças de tamanho de cidades e representação e ou peculiaridades locais.

Portanto, **efetivar o vínculo dos técnicos e dar-lhes estímulo e capacitação continuada**, representa hoje um dos grandes desafios a ser encarado pelo Estado do Pará a curto e médio prazo para que haja avanço no sistema de gerenciamento de recursos hídricos. A efetivação e valorização do corpo técnico traz motivação a equipe e se reproduz em credibilidade pública às atribuições analíticas inerentes à gestão desempenhada.

COMPONENTE 3: MONITORAMENTO

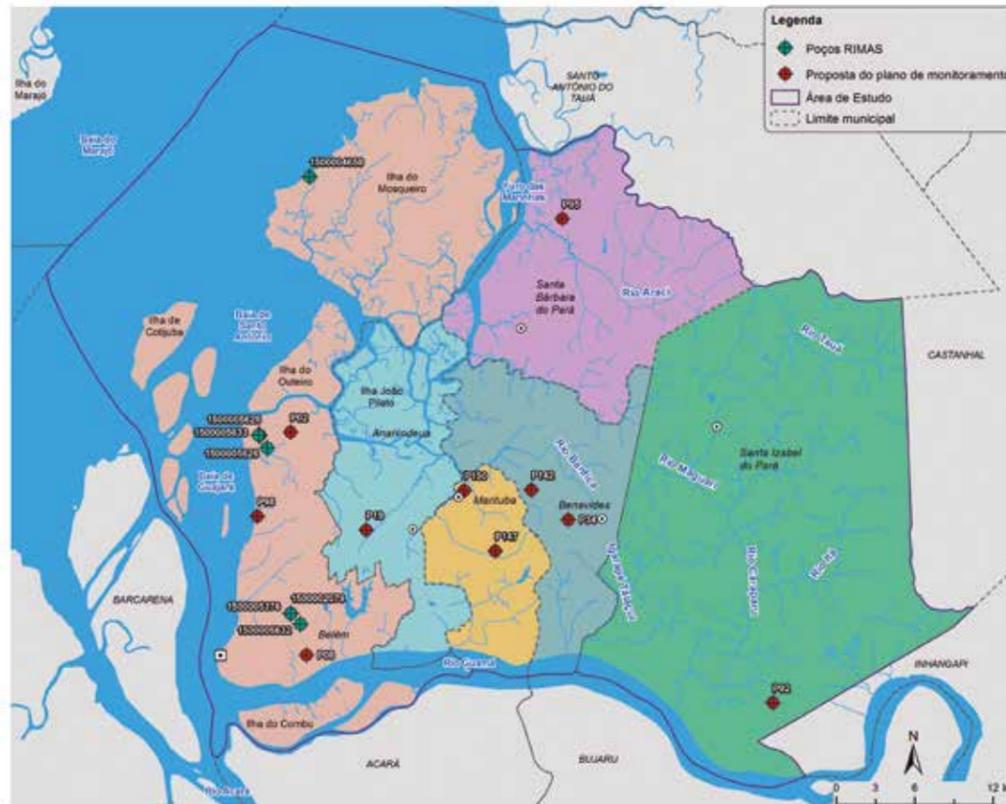
Proposta de rede de monitoramento quali-quantitativa

Para a sugestão da rede de monitoramento quali-quantitativa considerou-se um cruzamento entre as condições hidrogeológicas obtidas junto aos poços envolvidos na análise físico-química, uso e ocupação dos terrenos, em associação ao mapeamento de fontes potenciais de contaminação, as demandas hídricas atuais e futuras e as necessidades específicas dos diversos usuários.

Dentre os 150 poços escolhidos para a rede de amostragem de águas subterrâneas, foram selecionados 10 para integrar uma proposta de rede de monitoramento quali-quantitativa da área de estudo. **A seleção desses poços foi balizada pelos seguintes critérios:**

- Disponibilidade das informações sobre características construtivas e hidrogeológicas;
- Existência de cimentação e laje de proteção sanitária;
- Anuência do proprietário para inserção da captação na rede de monitoramento;
- Que amostram tanto parâmetros como todas as diferentes características hidrogeológicas identificadas nos intervalos aquíferos ocorrentes na área de estudo.

Localização dos poços indicados para a rede de monitoramento quali-quantitativa da região de Belém



Poços RIMAS localizados na área de estudo.

Ponto	Município	Formação	Condição	Proprietário	UTM X (m)	UTM Y (m)	Prof. (m)
1500002079	Belém	Formação Pirabas	Confinado	COSANPA 5º SETOR - PENTÁGONO	783110	9842122	270
1500004658	Belém	Formação Pirabas	Confinado	COSANPA - MURUBIRA	784535	9875559	264
1500005376	Belém	Formação Pirabas	Livre	COSANPA 5º SETOR - FEMAC	783110	9842092	188
1500005625	Belém	Formação Pirabas	Confinado	SAAEB - ICO - SOUZA FRANCO - CPRM	780711	9855770	252
1500005626	Belém	Formação Pirabas	Semi-Confinado	SAAEB - ICO - PARACURI - II	781298	9854786	280
1500005632	Belém	Formação Barreiras	Livre	P10_ CPRM_ BEL/ BELÉM	783850	9841292	100
1500005633	Belém	NI	NI	SAAEB_ ICO_ FUNASA	780650	9855770	NI

Fonte: SIAGAS (CPRM, 2018). NI = Não Informado

Além da rede proposta, cabe destacar os poços RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas da CPRM) existentes na área de estudo.

Poços eleitos para a rede de monitoramento.

Id	Id Coleta	Município	Aquífero	Proprietário	UTM X (m)	UTM Y (m)	Prof. (m)	Conc. mg/L
P19	P19	Ananindeua	Barreiras	Supermercado Formosa	788869	9848493	30	NO3 = 35
P34	CA34/ P34	Benevides	Barreiras	SAAE- Prefeitura de Benevides	804350	9849285	36	NO3 = 28; Fe = 0,6
P92	CA-092	Santa Izabel	Barreiras	SAAE	820047	9835246	24	NO3 = 11
P95	CA-095	Santa Barbara	Barreiras	Sr "Amoti"	803912	9872348	40	NO3 = 10
P142	CA-142	Benevides	Barreiras	SAAEB	801526	9851575	40	NO3 = 22
P03	P03	Belém	Pirabas Inferior	COSANPA	783094	9842093	188	Fe = 0,85; NH4 = 1,35
P11	P11	Belém	Pirabas Inferior	COSANPA	780614	9855736	252,05	Fe = 0,3
P02	P02	Belém	Pirabas Superior	Indaiá	783089	9855993	92	NO3 = 29; NH4 = 1,89
P147	CA-147	Marituba	Pirabas Superior	Cosanpa	798759	9846893	130	Fe=0,32
P150	CA-150	Marituba	Pós-Barreiras	Ademir Vasconcelos	796378	9851523	12	NO3 = 85



Plano de monitoramento das águas subterrâneas

MONITORAMENTO QUANTITATIVO:

O plano de monitoramento quantitativo proposto prevê a instalação de equipamentos automatizados de medição de níveis, de condutividade elétrica e de temperatura das águas subterrâneas. A frequência das medições pode ser estabelecida a intervalos curtos de tempo, de modo a registrar variações rápidas. Assim, recomenda-se programar o sensor para registro de níveis a cada 5 minutos.

A transmissão dos registros de nível de água, condutividade elétrica e temperatura da sonda para uma central de controle pode ser feita por telemetria a partir do armazenamento dos dados em *datalogger*, de modo que o usuário do sistema tenha acesso online ou baixar os dados diretamente do *datalogger* com auxílio de um *notebook*.

MONITORAMENTO QUALITATIVO:

O plano de monitoramento qualitativo segue os pressupostos encontrados na Resolução CONAMA 396/2008, que recomenda a avaliação dos seguintes parâmetros, considerados requisitos mínimos: sólidos totais dissolvidos, nitrato e coliformes termotolerantes, pH, turbidez e condutividade elétrica. Complementarmente, recomenda-se incluir os parâmetros ferro, amônia, cloreto e sulfato, uma vez que os últimos três compostos químicos são bons indicadores de contaminação antrópica. Recomenda-se o monitoramento mensal dos parâmetros listados.

Anualmente, recomenda-se análise completa com os parâmetros indicados na Portaria MS nº2.914/2011, revogada pela Portaria de Consolidação nº05/2017 que estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

COMPONENTE 4: PROTEÇÃO E CONSERVAÇÃO

Indicação de Áreas de Proteção da Zona de Recarga dos Aquíferos

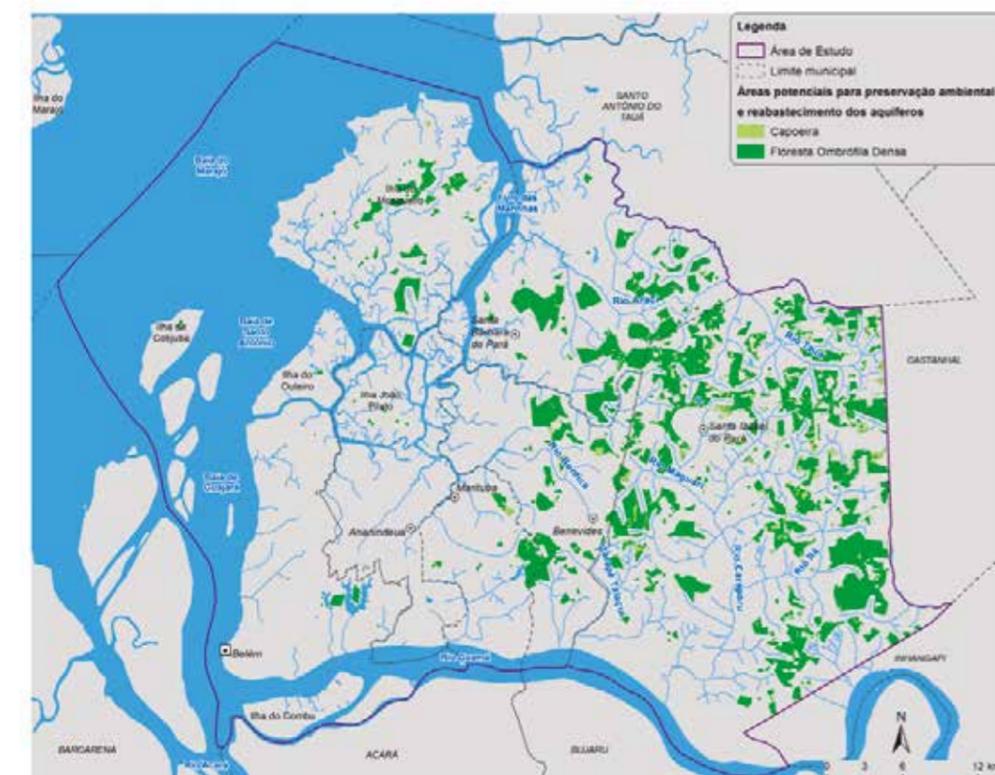
A maior parte das áreas classificadas como de recarga neste estudo localizam-se na porção leste da região, no município de Santa Izabel do Pará, em regiões de vulnerabilidade relativamente menor do que as regiões circunvizinhas. Não representam grandes áreas contínuas, mas sim, áreas de interflúvios (áreas compreendidas entre dois talwegues) interrompidas.

O cruzamento das áreas de recarga dos aquíferos com as áreas cobertas por remanescentes de vegetação nativa distinguiu uma série de pequenas porções naturais de terra, com área total de 218 km². Essas porções de terra de dimensões individuais bastante reduzidas são reconhecidamente extensões potenciais para utilização como áreas de proteção de aquíferos, pois reúnem características ambientais favoráveis à infiltração de água de precipitações atmosféricas.

À despeito das características favoráveis dessas áreas, boa parte delas encontra-se sob influência de fontes potenciais de contaminação, delimitadas no mapa de perigo de contaminação. Descartando-se aquelas sob influência de fontes potenciais de contaminação, restam ainda áreas com excelente potencial para preservação ambiental as quais teriam a função de proteção das áreas de recarga dos aquíferos, e que poderiam ser transformadas em reservas naturais, parques ou espaços ecológicos municipais.

Áreas potenciais para preservação ambiental e reabastecimento dos aquíferos

Município	Vegetação	Área (km ²)	Área Total (km ²)
Ananindeua	Capoeira	0,00	0,22
	Floresta Ombrófila Densa	0,22	
Belém	Capoeira	0,54	13,10
	Floresta Ombrófila Densa	12,56	
Benevides	Capoeira	1,24	17,22
	Floresta Ombrófila Densa	15,98	
Marituba	Capoeira	0,67	4,90
	Floresta Ombrófila Densa	4,23	
Santa Bárbara do Pará	Capoeira	1,20	34,73
	Floresta Ombrófila Densa	33,52	
Santa Izabel do Pará	Capoeira	10,55	117,93
	Floresta Ombrófila Densa	107,38	
Total			188,10



Áreas potenciais para preservação ambiental e reabastecimento dos aquíferos

Indicação de Áreas de Restrição e Controle

As Áreas de Restrição e Controle (ARC) são áreas nas quais existe a necessidade de disciplinar as atividades que possam causar alterações ou efeitos negativos sobre a quantidade ou qualidade das águas subterrâneas.

Os indicadores de disponibilidade utilizados referem-se à relação entre a quantidade de água disponível para uso e a quantidade de água captada por poços. Indicadores de qualidade da água subterrânea, como por exemplo nitrato, cloreto, sólidos totais dissolvidos, elementos de elevada toxicidade como arsênio, chumbo, organoclorados além de microorganismos patológicos, entre outros, alertam para a presença de fontes de contaminação associadas.

Os resultados deste estudo mostram que os aquíferos superficiais da área estudada, em especial as porções superiores do Barreiras, mostram elevado perigo de contaminação em decorrência da intensa urbanização e das atividades econômicas associadas. Análises físico-químicas de amostras de água de alguns poços que captam água do Barreiras apresentaram problemas de qualidade que acusaram concentrações de nitrato, cloreto, ferro, manganês e chumbo acima do permitido pela Portaria no 2.914/2011 do Ministério da Saúde (revogada pela Portaria de Consolidação no 05/2017). As contaminações constatadas foram pontuais.

Os indicadores de disponibilidade de água, por sua vez, mostram que os sistemas aquíferos se encontram em estágio de desenvolvimento equilibrado, ou seja, não existem evidências comprovadas de rebaixamento de níveis de água e diminuição do armazenamento devido à superexploração.

Diante do exposto admite-se que as áreas com perigo de contaminação considerado alto, conforme delimitadas neste estudo, requerem atenção especial no tocante à gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Essas áreas foram classificadas em Unidades de Gestão Especiais, nas quais sugere-se um controle maior nas análises dos pedidos de outorga, exigência de monitoramento de nível e análises químicas nos poços tubulares com extrações acima de 200 m³/dia.

São fundamentais a realização de campanhas de regularização dos usuários e adequação dos poços às normas construtivas vigentes, bem como a exigência da implementação dos perímetros de proteção dos poços utilizados no abastecimento público.

COMPONENTE 5: INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS

Diretrizes para o setor de infraestrutura e saneamento

A cobertura de coleta e tratamento de esgoto nos municípios da região de Belém é muito baixa ou até mesmo inexistente em alguns locais. Dos municípios da área de estudo Belém é o único que trata parte dos esgotos coletados. Nos demais municípios, apenas uma pequena parcela do esgoto é coletada, mas nenhuma parte é tratada. Devido à precariedade na infraestrutura de saneamento básico é comum na região a população dispor de soluções individuais in situ como fossas sépticas, filtros biológicos e sumidouros para o destino final dos esgotos domésticos. Nos bairros de baixa renda, há ainda situações em que os esgotos são destinados à fossas rudimentares, rede de drenagem, valas ou lançados diretamente nos corpos hídricos superficiais ou no solo. Essa prática, realizada durante anos, concentrada em uma mesma região, representa um contínuo aporte de contaminantes aos aquíferos e pode comprometer a qualidade da água, principalmente dos aquíferos livres. A contaminação dos aquíferos livres é preocupante, pois é comum na região a população se utilizar de poços rasos para consumo humano.

Visando minimizar os impactos da disposição inadequada dos esgotos domésticos no solo e a consequente contaminação das águas subterrâneas da região de Belém é de fundamental importância a ampliação dos sistemas de coleta e tratamento dos esgotos nas áreas urbanas densamente habitadas e a eliminação ou adequação das soluções individuais construídas fora dos padrões e normas técnicas brasileiras.

Em relação à drenagem urbana, sugere-se que a revisão dos PDDUs devem estabelecer os parâmetros urbanísticos de ocupação do solo, com destaque para as taxas de permeabilidade a serem mantidas, de acordo com a realidade de cada sede e do padrão de ocupação com vista à aumentar a recarga dos aquíferos; e que os mesmos incluam as zonas de proteção das áreas de recarga dos aquíferos.



Alternativas de incremento de água para abastecimento público

O maior sistema produtor de água existente na região de estudo, o Sistema Bolonha, abastece Belém e Ananindeua com água do Rio Guamá. Atualmente, porém, o sistema encontra-se operando abaixo da capacidade de projeto. A vazão produzida para distribuição é de 2,90 m³/s, sendo que o Sistema foi projetado para produzir até 8,30 m³/s. Dessa forma, sugere-se que seja avaliada a viabilidade técnica e econômica da revitalização e modernização desse Sistema, assim como a ampliação do sistema de adução para Belém, Ananindeua e Marituba (projeto previsto pela COSANPA) até a capacidade projetada.

Nos demais municípios, assim como em locais não atendidos pelo Sistema Bolonha em Belém e Ananindeua, sugere-se que atuem com o planejamento apoiado no uso de água subterrânea. A solução mais apropriada seria a adoção de um sistema de abastecimento baseado em poços profundos, com extração de água no Sistema Aquífero Pirabas, como já se faz atualmente nos sistemas isolados existentes.

Os resultados deste estudo em relação ao comportamento dos fluxos hídricos subterrâneos possibilitam a escolha de áreas mais favoráveis para a construção das obras de captação tanto no aquífero Barreiras, como no aquífero Pirabas.

Em relação às perdas, no âmbito dos PMSB, sugere-se ainda que seja criado um programa de controle de perdas reais (físicas) e aparentes (não-físicas). A redução de perdas reais diminui os custos de produção, pois propicia um menor consumo de energia, de produtos químicos e de outros insumos, utilizando as instalações existentes para ampliação da oferta, sem expansão do sistema produtor.

Por fim, recomenda-se envolver os grandes usuários de águas subterrâneas (saneamento, indústrias, shoppings, condomínios, hospitais, etc.), em um modelo de gestão participativa com o fornecimento de informações relevantes à gestão, principalmente com a apresentação de análises químicas periódicas e dos volumes explotados a partir de seus respectivos poços. Atualmente já é solicitado o monitoramento regular dos grandes usuários, sendo esta uma condicionante para a emissão da outorga, no entanto, esse procedimento ainda necessita de regulamentação pelo Estado.

Perímetros de proteção de poços de abastecimento público

Perímetros de proteção delimitam áreas no entorno dos poços com a finalidade de proteger as fontes de abastecimento de atividades antrópicas potencialmente poluidoras, as quais poderiam degradar a qualidade natural das águas subterrâneas e inviabilizar o uso pela população. Nessas áreas, as atividades potencialmente contaminantes podem ser restringidas ou mesmo proibidas, dependendo da avaliação do órgão ambiental gestor.

Neste estudo, recomenda-se a fixação de um raio de dez metros a partir do ponto de captação para delimitação do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária dos poços de abastecimento público. Esse perímetro também pode ser aplicado pelo órgão gestor a poços privados.

A delimitação do Perímetro de Alerta de poços de abastecimento público depende do nível de conhecimento sobre o aquífero explorado e da disponibilidade de dados hidrogeológicos. O objetivo de definir um Perímetro de Alerta baseia-se no princípio da prevenção, isto é, impedir que atividades potencialmente poluentes sejam exercidas nas proximidades da captação, de modo a minimizar os riscos de contaminação das águas subterrâneas por infiltração direta de substâncias ou elementos nocivos dispostos no terreno. Nesse sentido, este conceito é aplicável fundamentalmente a aquíferos livres, mas pode ser estendido para aquíferos semiconfinados, como é o caso da maior parte dos reservatórios integrantes dos sistemas Barreiras e Pirabas.

Neste estudo, o Perímetro de Alerta foi calculado pelo método do Raio Fixo Calculado (RFC). Os perímetros de proteção calculados variaram de o mínimo de 34 m ao máximo de 52 m. A equação do RFC mostra que incrementos do tempo de trânsito e da vazão de bombeamento aumentam o raio do perímetro de proteção dos poços, enquanto acréscimos na porosidade efetiva e na espessura saturada do aquífero diminuem o raio do perímetro.

A adoção de perímetros de proteção pelos órgãos ambientais gestores deve considerar toda a dinâmica envolvida na perfuração e operação dos poços de abastecimento público. Poços são periodicamente desativados e substituídos por outros com características diferentes de profundidade, vazão, etc. Significa que os perímetros de proteção aplicados para poços, numa determinada condição, podem não ser adequados às condições requeridas pelas novas captações. Por exemplo, um poço perfurado com cerca de 100 m de profundidade para extrair vazão de 80 m³/h tem seu perímetro de proteção estimado em 39 m, distância além da qual são admitidas atividades potencialmente poluentes; substituído por um poço com 250 m de profundidade e vazão de 350 m³/h, o perímetro recomendado amplia-se para 52 m, o que exigiria do órgão gestor uma reavaliação da área em relação ao cumprimento das exigências ambientais

Perímetros de proteção de poços dos aquíferos da região de Belém e municípios adjacentes estimados pelo método do RFC

Porosidade Efetiva	Espessura (m)	Tempo de trânsito (dias)	Vazão (m ³ /h)	Perímetro ou raio (m)
0,2	50	50	30	34
0,2	100	50	80	39
0,2	150	50	150	44
0,2	200	50	250	49
0,2	250	50	350	52

Adotando-se uma postura conservadora e de fácil implementação, recomenda-se um perímetro de alerta fixo estabelecido entre o mínimo de 60 m e o máximo de 100 m de distância de poços de abastecimento público. Esse perímetro fixo facilita a gestão pelo órgão ambiental, evita problemas relacionados a eventuais alterações das características hidrogeológicas e operacionais por substituição de poços e propicia um raio de proteção com maior segurança.



CONSIDERAÇÕES
FINAIS

A busca pelo aprimoramento do conhecimento hidrogeológico da região de Belém ensejou o desenvolvimento deste estudo, o qual permitiu, além da geração de novos dados nos âmbitos técnico e científico, a proposição de estratégias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos. O Plano de Gestão apresentado resultou de uma atualização do conhecimento hidrogeológico da área, em conjunto com o embasamento legal vigente. As informações acerca das disponibilidades hídricas, reservas subterrâneas, qualidade da água, entre outros, forneceram subsídios com a robustez necessária para orientar as ações de propostas na esfera da gestão do uso e abastecimento do público a partir das águas oriundas dos aquíferos existentes na área.

Adicionalmente, uma rigorosa pesquisa sobre as características sócioeconômicas, urbanização, saneamento, legislação e estruturação do sistema público, permitiu o traçado de um panorama da situação no que tange às questões relacionadas às águas subterrâneas. Importante observar a correspondência desses fatores, uma vez que percebe-se na região uma estreita relação entre a atividade antrópica e os recursos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos, dada a vasta quantidade de áreas de recarga, afloramentos de cursos d'água observada na região. Portanto, fez-se importante considerar, ao longo de todo o estudo, o balanço entre ações de conservação, demandas do crescimento urbano e populacional e reforço da infraestrutura institucional para controle da distribuição, armazenamento e aproveitamento da água em sua interface com as diferentes formas de consumo.

A alta disponibilidade de água observada confere à área uma correlação com o termo *wetland*, em que o monitoramento da qualidade da água deve assumir papel de grande relevância, tendo em vista a ampla disponibilidade. Sobre esse tema, os arranjos institucionais ganham espaço como cenário de discussão entre atores e municípios envolvidos na área de estudo.

Os resultados foram satisfatórios, pois atenderam às expectativas e permitiram embasar as análises necessárias. Algumas dificuldades foram observadas, como a disponibilidade de poços para realização dos testes de aquífero, ou a impossibilidade de cadastro e/ou coleta de água em alguns poços, bem como a desatualização ou indisponibilização de alguns dados oficiais, de extrema importância para a montagem do banco de dados utilizado. Além disso, observou-se alguma carência de dados secundários para embasar o estudo, como perfisagens e seções sísmicas.

Por outro lado, o conhecimento técnico acerca dos sistemas aquíferos da região de Belém foi atualizado nesses estudos com a utilização de várias ferramentas de avaliação multidisciplinares com vistas à obtenção de uma visão integrada de sua dinâmica e interações com o meio físico em geral. A atualização desse conhecimento, juntamente à compilação de informações existentes permitiu que o projeto levantasse novas óticas para a hidrogeologia da região de Belém e seu arcabouço estratigráfico e tectônico. Entretanto, ficou ainda visível como carece de maior riqueza de dados. Ainda, observou-se que os resultados dos ensaios de infiltração não trouxeram grandes contribuições, bem como a logística exigida para os testes de aquífero incorreram em dificuldades à sua ideal execução.



REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W.M.; REILLY, T.E.; FRANKE, O.L. Sustainability of Groundwater Resources. USGS Circular 1186. 79 pp.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia. Relatório Síntese/Agência Nacional de Águas – Brasília, DF: ANA; SPR, 2009.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal (RMN). Relatório Final – Volume 2 – Avaliação da Urbanização e de Outras Atividades Antrópicas Impactantes nas Águas Subterrâneas. Brasília, DF. 2012.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasil. ANA. 432 p. 2013.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas Esgoto: Deposição de Bacias Hidrográficas. 2017.
- ARAÚJO, P. P. Variações sazonais dos componentes nitrogenados, em aquífero livre na zona urbana de Santa Isabel do Pará, nordeste do estado do Pará. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará - Centro de Geociências - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Belém, 2001. 125 f.
- CABRAL, N.M.T. Impacto da Urbanização na Qualidade das Águas Subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal – Belém/PA. 2004, 289f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2004.
- CABRAL, N. M. T.; LIMA, L. M. 2006. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. In: Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 1, p. 149-166, jan-abr. 2006.
- CATETE, C. P. Investigações ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração do solo, polarização induzida e eletrorresistividade no Cemitério do Tapanã, Belém/Pará. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- COSANPA – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ. Dados obtidos por meio do Ofício nº 10/2018/SIP-ANA. Documento no 00000.005338/2018-95. 2018.
- COSANPA – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ. 2018. Dados obtidos por meio do Ofício nº 10/2018/SIP-ANA. Documento no 00000.005338/2018-95.
- COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. L.; VILLEGAS, J. M. C. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 74, p. 519-531, 2002.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. <http://siagas-web.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em Mai. 2018.
- CUSTÓDIO, E & LLAMAS, M.R. Hidrologia subterrânea. 2ª ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2v, 2350 p., 1996.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Aspectos Climáticos de Belém nos Últimos Cem Anos. 1ª Edição, Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.
- FERREIRA, C. S. Características lito-paleontológicas na Formação Pirabas, estado do Pará. In: CONFERÊNCIA GEOLÓGICA DAS GUIANAS, 1966, Belém. Anais... Belém, 1966, v.6, p. 101-111, 1966.
- FERREIRA, C. S. Correlação da Formação Pirabas (Mioceno Inferior), N e NE do Brasil, com as formações Chipola e Tampa da península da Flórida, USA. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PALEONTOLOGIA, 1. Buenos Aires. Atas... Buenos Aires: Asociacion Paleontologica Argentina. p. 49-55. 1980.
- FERREIRA, C. S. Notas estratigráficas sobre o cenozoico do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1. Belém, Anais. Belém: SBG, 1982. v. 1, p. 84-88. 1999. CD-ROM. 1982.
- FERREIRA, C. S.; CASSAB, R. C. T. Implicações Faciológicas da Família Pectinidae (Mollusca-Bivalvia) da Formação Pirabas, Oligo-Mioceno do Norte e Nordeste do Brasil. Brasília, MME-DNPM, Série Geologia 27, Seção Paleont. e Estrat. 2, p.205-209. 1985.
- FERREIRA, C. S.; FRANCISCO, B. H. R. As Relações da Formação Pirabas (Oligoceno- Mioceno), com as Formações Continentais Terciárias no NE do Pará. In: SBG – CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 35, Anais... Belém, 2:761-764. 1988.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegeningh (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands. 1987.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. Determinação do Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas: um Método Baseado em Dados Existentes. São Paulo: Instituto Geológico, n. 10, 1993. v. 1. 92 p.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; GOMES, D. C.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial/Servmar. São Paulo, 2006.
- GASPAR, M. T. P. 2001. Avaliação dos impactos da ocupação urbana sobre as águas da bacia Hidrográfica do Igarapé Mata Fome, Belém-Pa. 112 f. Dissertação (Mestrado) – a. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malhas Digitais. 2015. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>. Acesso em 08 fev. 2017.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Evolução da divisão territorial do Brasil 1872 – 1991: malha digital do ano 1970. 2016.
- IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. São Paulo: IG/ Cetesb/ DAEE. 2 v. mapas. (Série Documentos). 1997.]
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2009. 2. ed. 104 p.
- LIMA, L. M. 2000. Estudo do comportamento subsuperficial dos compostos nitrogenados em bairros densamente povoados de Belém. Belém: Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Departamento de Geologia. 60 p.
- MACE, R. E.; MULLICAN, W. F. & WAY, T. Estimating Groundwater Availability in Texas. Texas Water Development Board – TWDB. Texas. 16 p. 2001.
- MATTA, M. A. S. Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 292f. (Tese de Doutorado). 2002.
- MENDES, R. L. R. Geofísica aplicada ao mapeamento de aquíferos da Região Metropolitana de Belém. CPGF/UFGA. 72 p. (Dissertação de Mestrado). 2000.
- NIMMO, J.R., HEALY, R.W., STONESTROM, D.A. Aquífer recharge. In: Anderson, M.G., Bear, J. (Eds.), Encyclopedia of Hydrological Science, vol. 4. Wiley, Chichester, UK, pp. 2229– 2246. 2005.
- OLIVEIRA, J. G. F.; SILVA, R. C. S. Geologia e recursos minerais da Folha Belém - SA.22-X-D-III, Estado do Pará, escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil. Projeto Cartografia da Amazônia. CPRM: Belém. 2011.
- PETRI, S. Foraminíferos miocênicos da Formação Pirabas. Boletim Faculdade de Filosofia Ciências e Letras (Geologia), 216: 1-79. 1957.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2014. PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém. Elaborado por: B&B ENGENHARIA LTDA e GPAC AMAZÔNIA - UFPA. Apoio: Secretaria Municipal de Saneamento – SESAN; Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém – SAAEB; Agência Reguladora Municipal de Água e Esgoto de Belém. Apoio Técnico Financeiro: Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA. Belém, PA.
- ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R.; DOMINGUEZ, J. M. L. Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. Earth-Science Reviews, v. 123, p. 87-112. 2013.
- SÁ, J. H. S. Contribuição à Geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, Estado do Pará. Boletim Geológico (UFRJ), 3: 21-36. 1969.
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2011. Série Histórica 2011. Disponível em <www.snis.gov.br/> Acesso em: novembro de 2017.
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2012. Série Histórica 2012. Disponível em <www.snis.gov.br/> Acesso em: novembro de 2017.
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2015. Série Histórica 2015. Disponível em <www.snis.gov.br/> Acesso em: novembro de 2017.





AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

Setor Policial, área 5, Quadra 3,
Blocos "B", "L", "M", "N", "O" e T.
PABX: (61) 2109-5400 | 21095252
www.ana.gov.br



Av. Iguaçu, 451, 6º andar, Petrópolis.
Porto Alegre - RS. CEP: 90470-430
Fone | Fax: (51) 3211-3944
www.profill.com.br

