

NEOTECTÔNICA E ESTRUTURAÇÃO DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS DA REGIÃO DE CASTANHAL / PA

NEOTECTONIC AND STRUCTURE OF HYDROGEOLOGICAL SYSTEMS OF CASTANHAL/PA REGION

Iris Celeste Nascimento Bandeira¹, Francisco Assis Matos de Abreu²

Artigo recebido em: 11/11/2010 e aceito para publicação em: 16/11/2011

Abstract: The morphostructural and hydrogeological study conducted at Castanhal - PA in two different scales, 1:100,000 and 1:25,000, allowed the understanding of relationships between hydrogeological systems' geometrical elements and structural elements related to neotectonic events as a basis to determine, among other aspects, potential recharge areas of these systems. The morphostructural study, aided by geophysical data collected, showed that the area has a structural control related to a neotectonic pulse that triggered the reactivation of faults with NW-SE, NE-SW, EW and NS directions. This led to anomalies and changes in drainage patterns and conditioned the establishment of units where flat-topped hills, pediplanized hills, and major river plains were produced. These faults may be compatible with a stress field that generated a geometric arrangement characterized by tectonic blocks and a dextral kinematic configuration, where tensile faults were formed in NW-SE direction, setting up important conduits for the recharge of hydrogeological systems. The area studied is composed by three hydrogeological systems: Superior, Barreiras, and Pirabas, which present variable depth related to the vertical rupture of rock layers, promoted by neotectonic faults. These hydrogeological systems, considered confined (Pirabas) to semi-confined (Barreiras), have a recharge component from fault zones and fault trace of NW-SE direction. The recharge of free aquifers occurs through direct precipitation, from rain water at the Midwest and northeast of the studied area.

Keywords: Hydrogeology. Neotectonics. Recharge. Castanhal-PA, Brazil.

Resumo: O estudo morfoestrutural e hidrogeológico realizado no município de Castanhal - PA em duas escalas distintas, 1:100.000 e 1:25.000, permitiu avançar no entendimento das relações entre elementos geométricos dos sistemas hidrogeológicos e elementos estruturais relacionados aos eventos neotectônicos como base para determinar, entre outros aspectos, áreas potenciais de recarga destes sistemas. O estudo morfoestrutural auxiliado pelos dados geofísicos levantados mostrou que a área tem um controle estrutural relacionado a um pulso neotectônico, responsável pela reativação de falhas de direção NW-SE, NE-SW, E-W e N-S, as quais provocaram anomalias e mudanças nos padrões de drenagem, assim como condicionaram o estabelecimento de unidades de relevo onde se destacam planícies fluviais, colinas pediplanizadas e colinas de topo aplainado. Essas falhas podem ser compatibilizadas em um regime de esforço que gerou um arranjo geométrico caracterizado por blocos tectônicos, bem como um quadro cinemático dextral, onde se formaram falhas trativas na direção NW-SE, configurando importantes condutos para a recarga dos sistemas hidrogeológicos. Na área em consideração foram reconhecidos três sistemas hidrogeológicos: Superior, Barreiras e Pirabas que apresentam profundidades variáveis, relacionadas aos deslocamentos verticais, provocados por falhas neotectônicas. Os sistemas hidrogeológicos considerados como confinados (Pirabas) a semiconfinados (Barreiras) têm uma componente de recarga a partir de zonas de falhas e fraturas trativas de direção NW - SE. Já a recarga dos sistemas hidrogeológicos livres se dá pela precipitação direta, a partir da água da chuva na porção centro-oeste e nordeste da área de estudo.

Palavras Chaves: Hidrogeologia. Neotectônica. Recarga. Castanhal-PA.

INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais consumidos pela sociedade moderna. Atualmente muito se fala em racionalização de sua utilização, pois acredita-se que, apesar da abundância deste recurso em regiões como a Amazônia, havendo desperdício e um mau gerenciamento o recurso pode sofrer um *déficit* em termos de quantidade e

qualidade.

Para que tal cenário não venha a acontecer é necessário um gerenciamento adequado, sustentado por conhecimentos científicos que priorizem a compreensão do comportamento e da interrelação que existe entre águas superficiais e subterrâneas. Com base em estudos dessa natureza se poderá

¹CPRM. (bandeira4@yahoo.com.br)

²Universidade Federal do Pará/UFPA. (famos@ufpa.br)

avaliar mais rapidamente, por exemplo, impactos ambientais sobre as águas de uma determinada região. O nordeste do Pará, inserido no contexto amazônico, onde ocorrem de forma principal os sistemas hidrogeológicos Barreiras e Pirabas, considerados grandes reservatórios de água subterrânea do Brasil (OLIVEIRA, 2003), é ainda pouco conhecido em termos de parâmetros hidrogeológicos.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo o entendimento da relação entre elementos geométricos dos sistemas hidrogeológicos existentes ao norte da cidade de Castanhal-PA, e os aspectos estruturais, principalmente aqueles relacionados aos eventos neotectônicos, como base para determinar áreas potenciais de recarga destes sistemas.

Para atingir este objetivo, o trabalho integrou dois tipos de estudo: morfoestrutural e hidrogeológico. Para esta integração seguiu-se a seguinte metodologia: pesquisa bibliográfica e coleta de informações técnicas; geração de um sistema de informações geográficas - SIG, para auxiliar na elaboração dos mapas constantes neste trabalho; análise da drenagem e do relevo em escala regional e de semidetalle, conforme metodologia de Stewart e Hancock (1994), Soares e Fiori (1976), Howard (1967) e Costa (2004); campanhas de campo (abril, setembro e novembro de 2007), para coleta de dados hidrogeológicos e geofísicos; elaboração de seções e perfis geofísicos (sondagem elétrica vertical) e caracterização hidrogeológica (geometria dos sistemas hidrogeológicos, mapeamento de fluxo e determinação das áreas de recarga).

A ÁREA EM CONSIDERAÇÃO

A área estudada compreende dois recortes diferentes. No primeiro, de cunho regional, foram realizados estudos morfoestruturais em escala 1:100.000 na porção nordeste do Estado do Pará, mais especificamente na porção oeste da folha SA-23 – V - C - I (Figura 1). Está área engloba a maior parte do município de Castanhal-PA, a porção oeste de São Francisco do Pará, norte de Inhangapi e São Miguel do Guamá, leste de Santa Izabel do Pará, leste de Santo Antônio do Tauá e Vigia, sul de Terra Alta, São Caetano de Odivelas e de Marapanim.

No segundo recorte foi feito um estudo morfoestrutural e hidrogeológico na escala 1:25.000, cuja a área investigada corresponde a Folha SA-23 – V - C - I -1-SO, ou seja, recobre o centro oeste do município de Castanhal e sul do município de Santo Antônio do Tauá (Figura 1). Além destes estudos, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os aspectos geológicos e climáticos, na área do segundo recorte, com o objetivo de embasar a análise hidrogeológica.

CLIMA

A recarga dos aquíferos superficiais está intimamente ligada à retenção hídrica e tem relação direta com a incidência das chuvas. Portanto, é de extrema importância entender o comportamento dos aspectos climáticos de uma dada região para conhecer a sua potencialidade hídrica.

De acordo com os dados de 2003 a 2007, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/ 2º Distrito de Meteorologia/PA, o clima da região de Castanhal corresponde ao tipo “Af”, da classificação de Köppen, pois é caracterizado pela ocorrência de precipitação em todos os meses do ano, com média anual entre os anos 2003 a 2007 de 2103 mm/ano, ocasionando uma temperatura elevada com média de 26°C e máxima de 32°C. Possui pequena amplitude térmica e umidade relativa do ar em torno de 82%. A estação chuvosa ocorre no período de janeiro a maio e a menos chuvosa de junho a dezembro, sendo os meses de setembro e novembro os menos chuvosos.

Lima et al. (1994), elaboraram um balanço hídrico para a região de Castanhal/PA, baseado em dados do ano de 1975 a 1987 e fundamentado na aplicação do princípio de conservação da massa de água, proposto por Thornthwaite e Mather (1955) que além da obtenção da classificação climática, também indica o comportamento da entrada e saída da água no solo. Baseado nesse tipo de dado obteve-se a figura 2, que apresenta o comportamento das linhas de P, DEF e EXC, onde se verifica que durante o período de janeiro a agosto, o comportamento da linha de excedência é semelhante ao da precipitação. Tal comportamento é explicado pelo grande volume de água disponível durante esse período. A deficiência, por sua vez, permanece zero até agosto. A partir de setembro passa a haver um déficit.

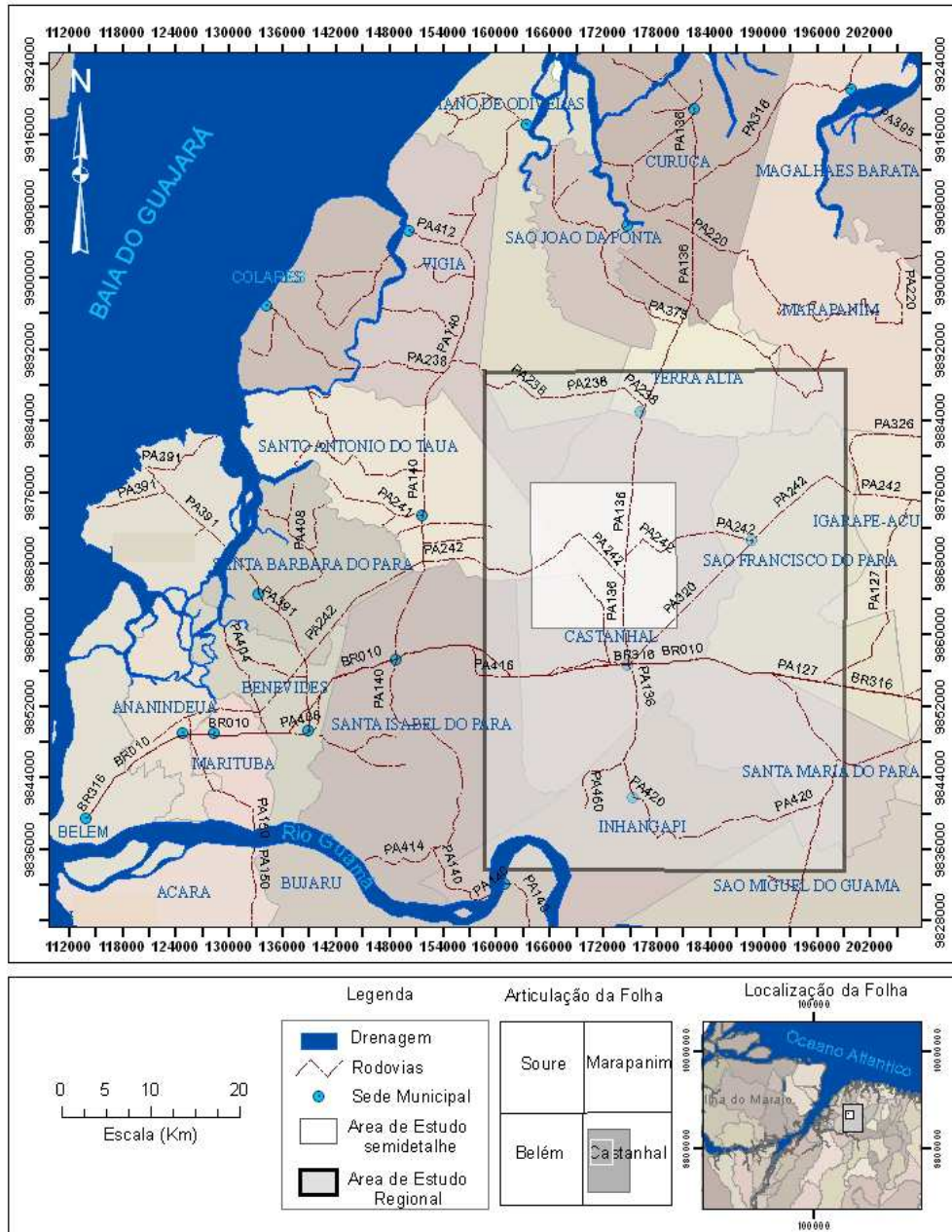


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

Figure 1 - Location map of the area studied

Fonte: SETRANS (2000)

Source: SETRANS (2000)

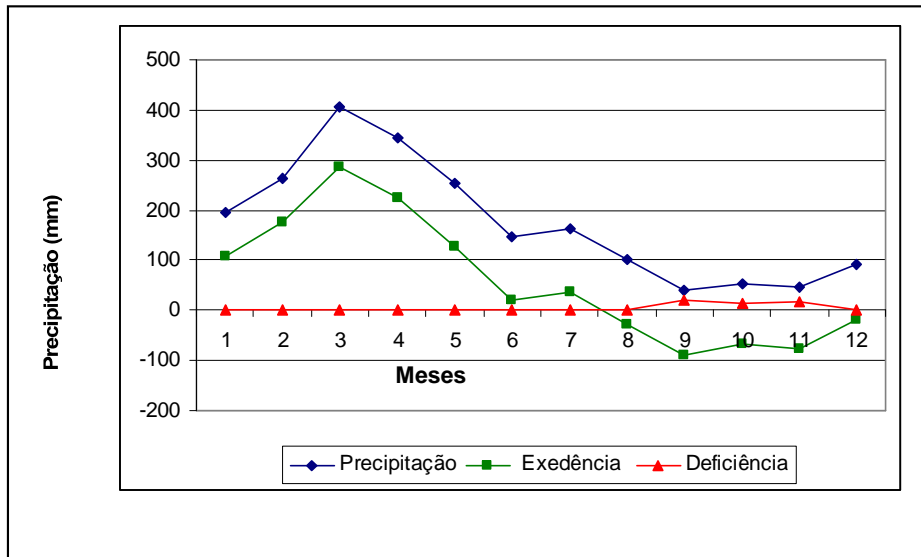


Figura 2 - Representação gráfica das linhas P, DEF e EXC hidrica para a região de Castanhal/PA (Período de 1975 a 1987)

Figure 2 - Graphical representation of P, DEF and EXC lines, hidric to Castanhal / PA region (Period 1975-1987)

GEOLOGIA

As rochas que afloram no município de Castanhal são caracterizadas como sedimentares, onde se destacam: o Grupo Barreiras, Sedimentos Pós-Barreiras e Sedimentos Recentes (SOUZA JUNIOR; QUADROS; BEZERRA, 1992 apud BANDEIRA; ABREU, 2009), conforme figura 3 e 4.

Dados de poços profundos (OLIVEIRA, 2003) mostram que este pacote sedimentar prolonga-se em subsuperfície, englobando rochas do Grupo Barreiras e Pirabas, cuja espessura total do pacote sedimentar é ainda desconhecida.

Era	Período	Época	Unidades	Descrição
Cenozóica	Quaternário	Holoceno	Sedimentos Recentes	Argilas de coloração branca acinzentada, com manchas vermelhas a amareladas devido a oxidação do ferro.
			Pós-Barreiras	Sedimentos areno-argilosos, maciços, coloração amarela, apresentando grânulos de quartzo e concreções ferruginosas dispersas aleatoriamente.
	Terciário	Mioceno Plioceno	Grupo Barreiras	Sedimentos argilosos com laminação plano paralela, coloração vermelha amarelada com tons esbranquiçados, bioturbados, localmente gretas de contração; sedimentos arenosos de granulação fina a média, estratificações cruzadas do tipo acanalada (Tangencial), sigmoidal e estratificações de maré; sedimentos areno-argilosos maciços ou com estratificações incipientes; conglomerados com seixos de quartzo e quartzito.

Figura 3 - Coluna Estratigráfica da Região de Castanhal

Figure 3 - Stratigraphic Column of Castanhal Region

Fonte: Souza Junior, Quadros e Bezerra, 1992 apud Bandeira e Abreu (2009)

Source: Souza Junior, Quadros e Bezerra, 1992 apud Bandeira e Abreu (2009)

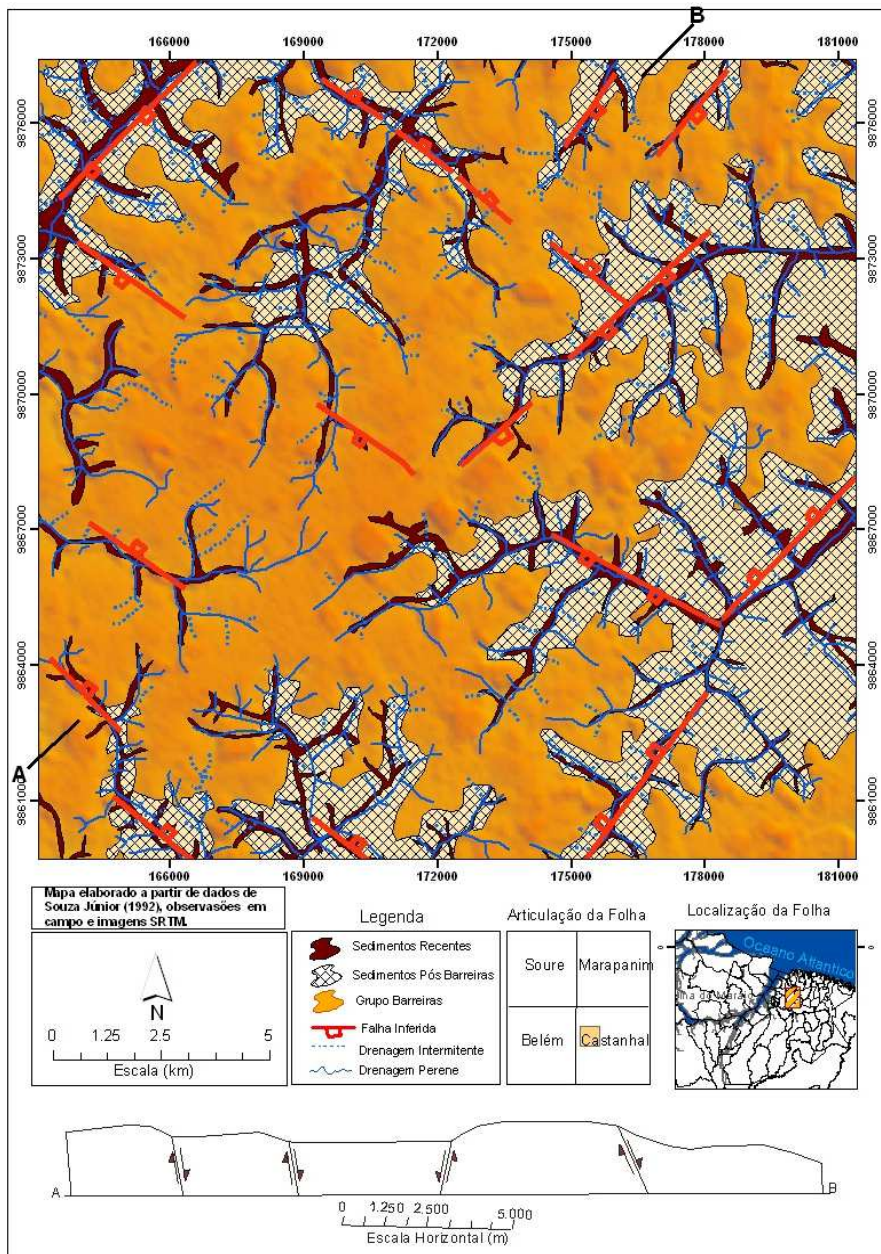


Figura 4 - Mapa Geológico da Folha SA-23 – V - C - I -1-SO

Figure 4 - Sheet SA-23 – V - C - I -1-SO geological Map

Fonte: Bandeira e Abreu (2009)

Source: Bandeira e Abreu (2009)

ANÁLISE MORFOESTRUTURAL

Segundo Argento (2001), a análise morfoestrutural é uma ferramenta fundamental para delinear a causa dos fatos geomorfológicos derivados dos grandes aspectos geotectônicos, dos grandes arranjos estruturais e, eventualmente, da predominância de uma litologia definida.

Análise Morfoestrutural Regional

Com base na análise do relevo e da drenagem da porção oeste da folha SA-23 -V - C -I

observou-se que a área de estudo está dentro de um quadro tectônico regional, onde os sismos não são tão frequentes e nem tão intensos como em regiões de bordas de placas litosféricas, mas são representantes da atual dinâmica intraplaca e essenciais para estudos de neotectônica.

Berrocal et al. (1984) fizeram um inventário dos sismos ocorridos até 1981, no qual estão registrados os sismos ocorridos no nordeste do estado Pará (Tabela 1):

Baseado nos dados históricos dos sismos ocorridos, pode se dizer que na área o quadro morfoestrutural é considerado morfotectônico, com

alguns dados geométricos e cinemáticos observados e descritos a seguir.

Tabela 1 - Dados de sismos sentidos no nordeste do estado do Pará
Table 1 - Data of seismic events at the northeastern of Para state

Registro	Local do tremor	Período	Magnitude na escala Richter
1º	Vigia	12 de julho de 1860	
2º	Belém	07 de outubro de 1946	
3º	Belém, Ananindeua, Mosqueiro, Abaetetuba, Castanhal e Vigia	12 de janeiro de 1970	4,5
4º	Nordeste da ilha do Marajó	02 de agosto de 1977	
5º	Ilha do Marajó	18 de outubro de 1980	3,1
6º	Lat 02,83°S / Long 49,13°W, nordeste do Pará	14 de novembro de 1980	2,8
7º	Lat 02,85°S / Long 50,60°W, nordeste do Pará	09 de fevereiro de 1981	2,7

Fonte: Berrocal et al. (1984)

Aspectos geométricos

A integração dos dados de relevo e de drenagem associados à geologia da área permitiu gerar um mapa morfoestrutural (Figura 5) que mostra:

✓ Três unidades morfológicas onde se observam alinhamentos de direção: N0°-10°W, N20°-30°W, N40°-50°W, N60°-70°W, E-W, N30°-40°E, N40°-50°E e N60°-70°E;

✓ Padrões retilíneos e assimetrias de drenagens, evidenciando um controle estrutural caracterizado por falhas normais, responsáveis por deslocamentos verticais de blocos. Estas falhas possuem duas direções preferências NE-SW e NW-SE.

Na porção noroeste da área (Figura 5) observam-se falhas de direção NE-SW, com mergulhos no sentido SE, indicando um abatimento de blocos nesse mesmo sentido. Na porção centro-oeste observam-se falhas de direção NW-SE formando um *graben*. A sudeste as falhas de direção NE-SW possuem mergulhos no sentido SE.

Aspectos Cinemáticos

Na área foram observados indicadores de movimentação tectônica, tais como: assimetria da drenagem (indicativos de movimentação vertical) e mudanças no padrão de drenagem; trechos retilíneos que se tornam sinuosos com brusca mudança de orientação, o que pode significar uma falha ou um bloco abatido; anomalias em Z e S, controladas

por deslocamentos de superfícies estruturais, que podem indicar movimentação de blocos.

A integração das informações dos aspectos geométricos e cinemáticos do relevo e da drenagem pode associar esses elementos a um controle tectônico, que geralmente está relacionado a modelos de deformação.

Nesse caso, o modelo utilizado para compatibilizar e explicar esses elementos estruturais geométricos foi o de *Riedel* que trata da deformação rúptil não coaxial.

Verificou-se que a área tem suas estruturas compatibilizadas ao funcionamento de um binário destal E-W, gerando dois planos principais de direção N60°-70°W, com possível deslocamento destal (não observado) e outro lineamento N10°-20°W com indicação de movimento sinistral, comprovado pelas formas em “S” nas drenagens. Além destes planos, existem fraturas sintéticas secundárias na direção N60°-70°E com indicação de deslocamento destal, verificado pelas formas em “Z” nas drenagens nestas direções.

Os alinhamentos de direção N20°-40°W, correspondentes aos Igarapés Pau Amarelo e Rodrigues, Maracanã, estariam encaixadas, segundo o modelo proposto, nos planos distensivos. Estes segmentos são áreas de prováveis deslocamentos verticais e apresentam maior favorabilidade à penetração vertical da água, podendo ser considerado

como zonas de recarga dos aquíferos rasos e profundos.

Esses dados do meio físico estão condizentes com o padrão regional apresentado por Costa et al. (1996), no qual mostram que a neotectônica do

nordeste do Pará, onde está inserida a área de estudo, é caracterizada por falhas normais com direção NW-SE, correspondente à transtensão vinculada à atuação de sistemas transcorrentes destrais.

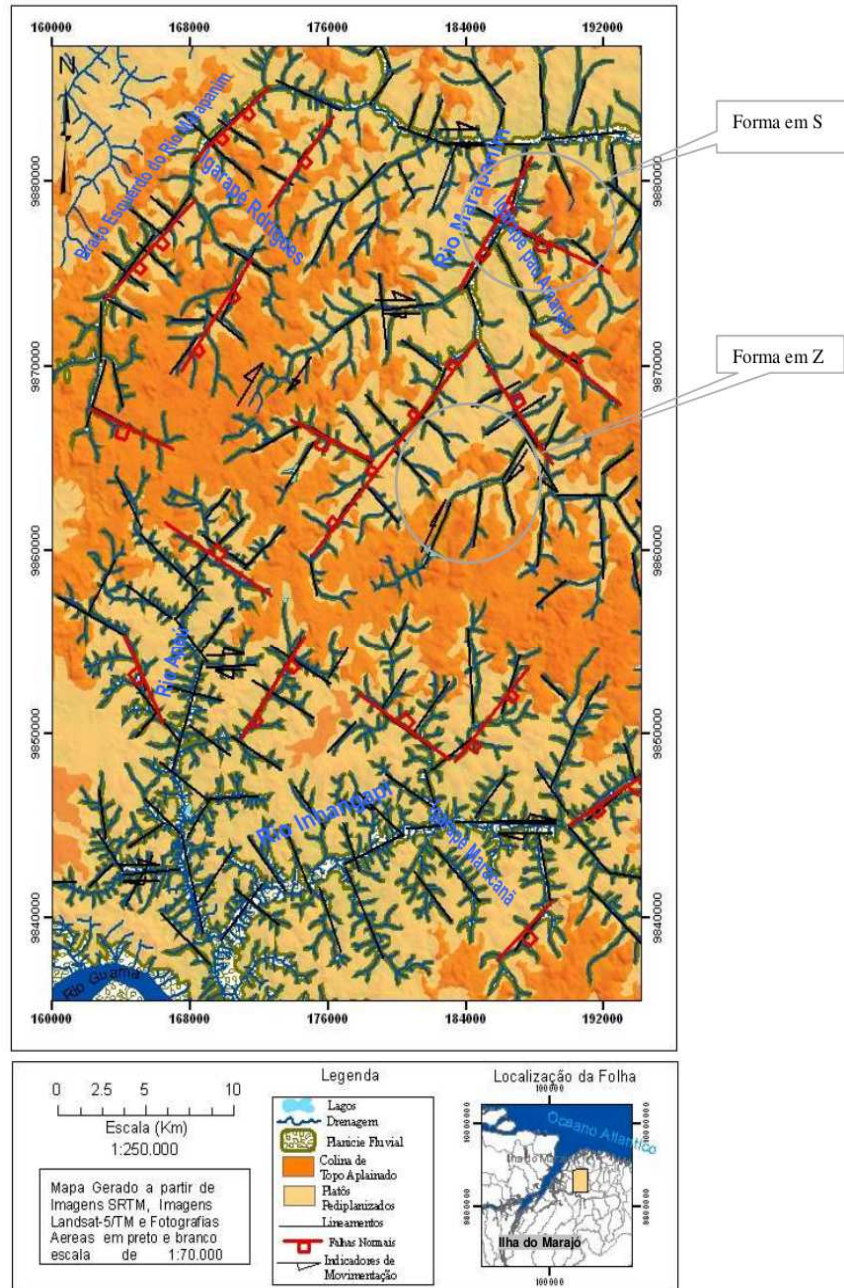


Figura 5 -Mapa Morfoestrutural Regional mostrando as principais Unidades de relevo condicionadas a um arranjo geométrico estruturado

Figure 5 - Morphostructural map showing the main terrain units conditioned by a geometric structure arrangement

Tabela 2 - Descrição dos blocos estruturais do mapa morfoestrutural da Folha SA-23 – V - C - I -1- SO**Table 2** - Building blocks' description of Sheet SA-23 - V - C - I - 1--SO morphostructural map

Bloco	Localização	Dimensões das arestas	Direção principal	Abatimento
2	Noroeste	Aresta maior em torno de 7 km e a menor em torno de 6 km	NE-SW	Abatimento em relação ao bloco 1 no sentido SE
4	Nordeste	Aresta maior com valor de 7,5 km e a menor em torno de 5 km	NW-SE	Abatimento em relação ao bloco 7 no sentido NE
7	Central	Aresta maior próximo de 7 km e a menor em torno de 5,5 km	NE-SW	É caracterizado como um <i>horst</i> , por ser um bloco alto, limitado por falhas normais.
8	Leste	Aresta maior em torno de 8 km e a menor em torno de 6,5 Km	NE-SW.	Abatido no sentido SE em relação ao bloco 7 e no sentido NW em relação ao bloco 12, caracterizando um <i>graben</i> .
10	Centro-oeste	Aresta maior em torno de 8km e a menor de 6,2km	NW – SE	Abatimento no sentido SW.
11	Sudeste	Aresta maior em torno de 7, 5km e a menor em torno de 5,3 km	NW – SE	Abatimento no sentido SW.

Análise Morfoestrutural em Escala de Semidetalhe

O estudo morfoestrutural em semidetalhe do relevo e da drenagem da Folha SA-23 – V - C - I -1-SO, mostrou que a drenagem apresenta padrões como treliça, retangular e paralelo, anomalias como retilinearidade, aparecimento abrupto e localizado de meandros, assimetrias distintas relacionadas ao comprimento dos seus afluentes, que comprovam o abatimento de blocos, estreitamento anômalo de vales ou canais, curvas anômalas e um relevo alinhado segundo duas direções principais: N50°-60°W e N40°-50°E.

Estas evidências reforçam a ideia de que a área em questão reflete um controle estrutural, no qual foi possível adotar a metodologia proposta por Costa (2004), que se baseia nos padrões da drenagem e do relevo para esboçar um arranjo geométrico bidimensional da área. Com base na análise morfoestrutural foi gerado um mapa morfoestrutural onde se destacam três unidades morfológicas, seccionadas por alinhamentos de drenagens e de

relevo com direções NW- SE, NE-SW, N-S, E-W, que formam polígonos, na sua grande maioria retangulares (Figura 6).

Os alinhamentos maiores, de direção NE-SW, seccionados por alinhamentos menores de direção NW-SE, definiram 16 blocos com arestas maiores variando entre 5 e 8Km e as menores variam entre 3 e 7 km. Estes blocos foram abatidos em quatro sentidos principais NE, SW, NW, SE, descritos na tabela 2:

A análise integrada da drenagem e do relevo, relacionadas às informações geológicas do terreno e dos perfis geofísicos, mostrou que a área de estudo em escala de semi-detalhe 1:25.000, assim como a de estudo regional 1:100.000 enquadram-se no contexto regional descrito por Costa et al. (1996), ou seja, estão inseridas num contexto estrutural neotectônico, onde as direções NW-SE seriam as mais distensivas.

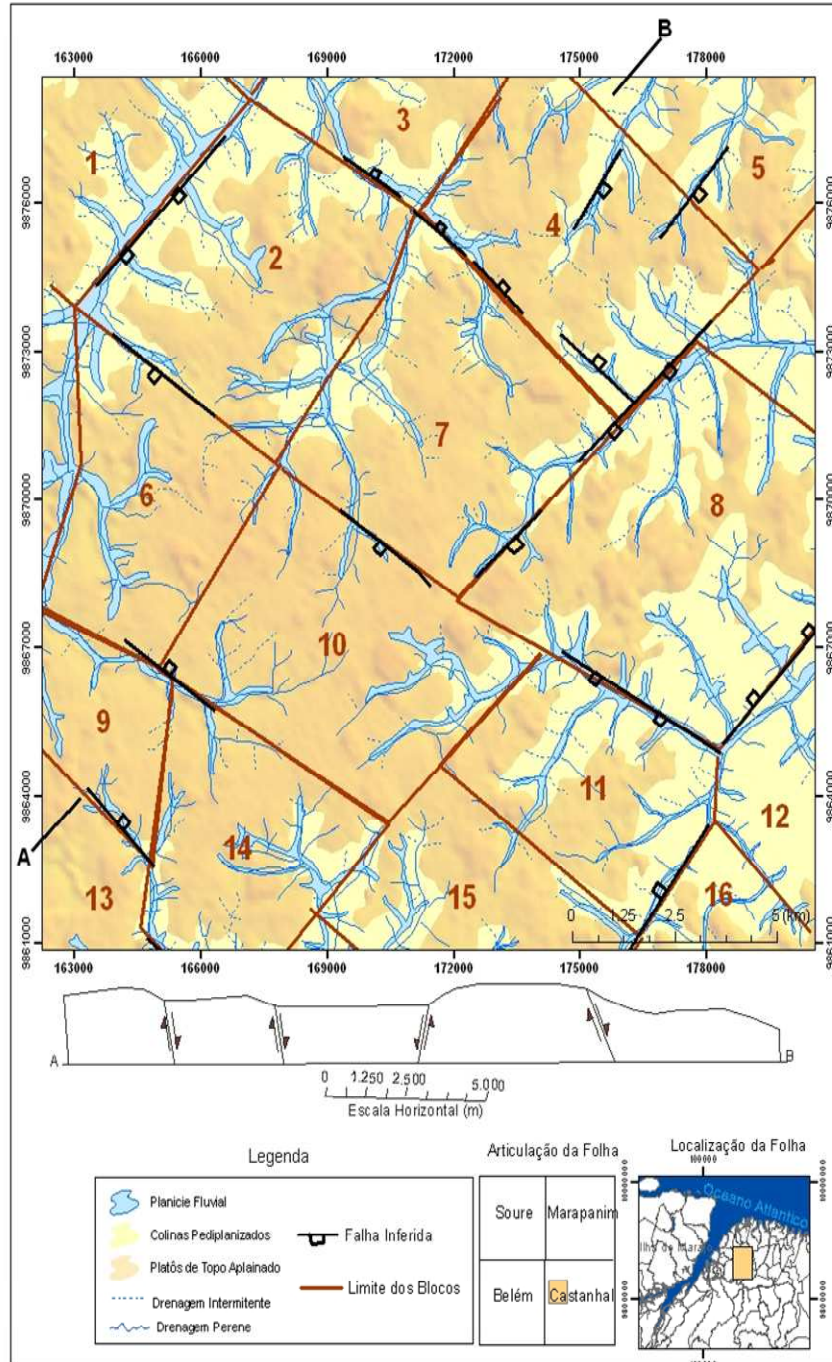


Figura 6 - Mapa morfoestrutural da Folha SA-23 – V - C - I - 1-SO, Mostrando a relação entre morfologia e os 16 blocos estruturais

Figure 6 -Sheet SA - 23 – V - C - I - 1-SO morphostructural map, showing the relationship between morphology and the 16 building blocks

Caracterização Hidrogeológica

Dentre os parâmetros hidrogeológicos estudados, enfatiza-se a recarga dos aquíferos da Folha SA-23 – V - C - I - 1-SO, tendo como base estudos sobre a geometria dos sistemas geológicos e dados do comportamento do fluxo subterrâneo do sistema hidrogeológico livre.

Geometria dos Sistemas Hidrogeológicos

O arranjo espacial dos pacotes sedimentares foi modificado pela atuação neotectônica, refletindo-se em mudanças no caimento das camadas que agora se encontram em posições diferentes daquelas que tinham quando da sua deposição. Essas mudanças influem sobre as características

dos aquíferos quanto a continuidade lateral, fluxo, recarga, vazão, etc.

Para avançar nas definições da geometria dos sistemas hidrogeológicos da área foi realizado levantamento geofísico utilizando o método geoeletrico de eletrorresistividade, mais especificamente sondagens elétricas verticais – SEV. Essas SEVs foram correlacionadas à perfis de poços situados próximos a estas.

Com base em oito sondagens elétricas verticais, posicionadas perpendicularmente aos principais alinhamentos de drenagem, foi possível avançar no entendimento da disposição das camadas litológicas em sub-superfície, definindo profundidade do topo das mesmas, bem como suas espessuras, assim como foi possível elaborar seções dessas camadas litológicas em sub-superfície (Figura 7 e 8). Nestas seções observa-se:

- ✓ Camadas aquíferas compostas por arenitos e calcarenitos, justapostos a camadas impermeáveis a semi-permeáveis representadas geralmente por argilitos, folhelhos e siltitos;
- ✓ Descontinuidades (prováveis falhas) com rejeitos verticais impostas pela atuação neotectônica que alcançam dezenas de metros (desníveis de mais de 20m);

- ✓ Variação lateral das espessuras de camadas, além de eventuais desaparecimentos de camadas, observadas em seções contíguas;

- ✓ Indicação de desenvolvimento de um arranjo estrutural em blocos com formação de estruturas do tipo *horst* e *graben*.

A visão integrada dos dados de SEVs, associados às informações da geologia de superfície e aos dados de poços, permitiu definir três sistemas hidrogeológicos: Superior, Barreiras e Pirabas.

- ✓ O Sistema Hidrogeológico Superior pode ser encontrado a partir de 2 a 8 m de profundidade, com espessura média de 12 m e caracteriza-se como livre;

- ✓ O Sistema Hidrogeológico Barreiras encontra-se entre 20 a 30m de profundidade, com espessura média de 25m. Caracterizado como livre a semiconfinado;

- ✓ O topo do Sistema Hidrogeológico Pirabas pode ser encontrado entre 90 e 115m de profundidade. Este sistema é sobreposto por uma camada argilosa espessa, que caracteriza o sistema como confinado, quando se considera apenas os aspectos geométricos de sucessão de camadas. Com os dados disponíveis, esse sistema se prolonga até profundidades de 150m.

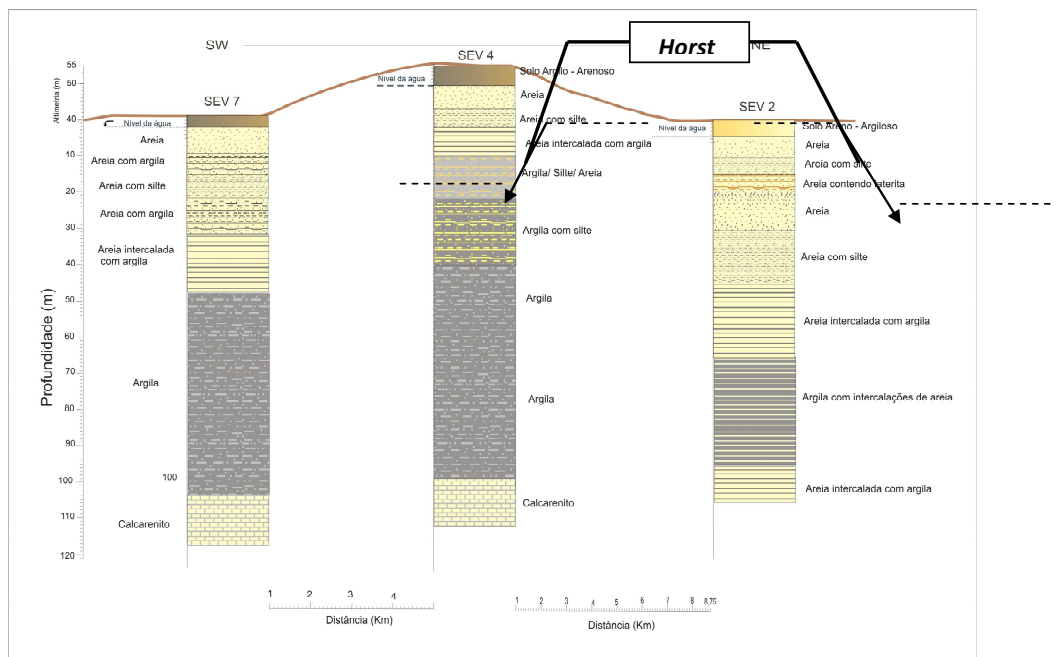


Figura 7 - Seção NW-SE – mostrando mergulho das prováveis falhas nos sentidos SW e NE, configurando um horst

Figure 7 - Section NW-SE - showing probable faults' depth in SW and NE directions, forming a horst

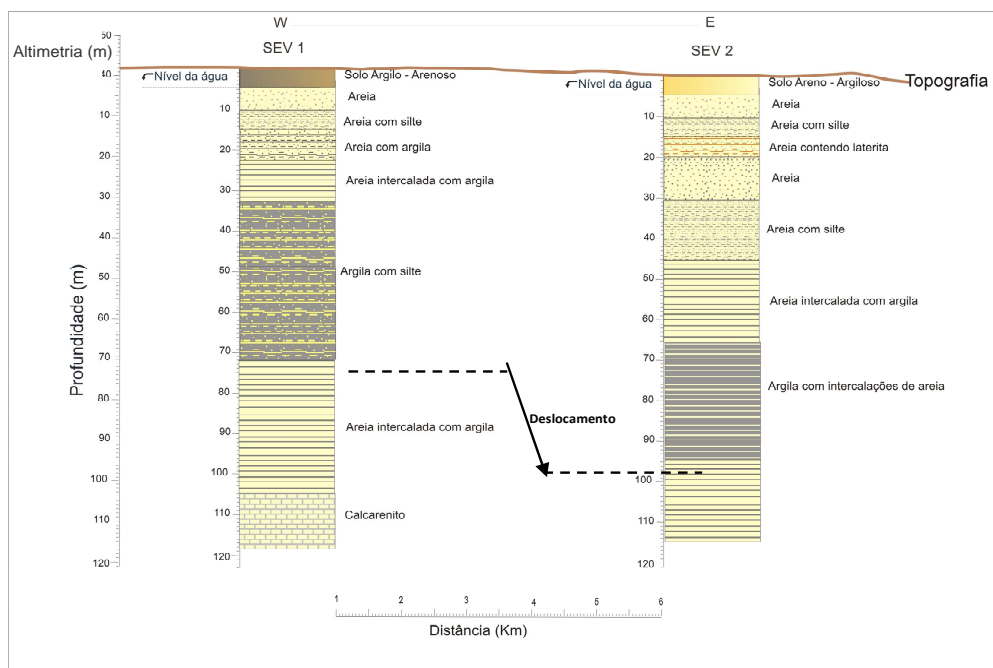


Figura 8 - Seção W-E mostrando o deslocamento das camadas (areia com silte) e indicação de falha com mergulho no sentido leste

Figure 8 - WE section showing the disrupt of layers (sand with silt) and fault indication with dip towards east

MAPEAMENTO DO FLUXO SUBTERRÂNEO

O mapeamento do fluxo hídrico subterrâneo considerou os sistemas hidrogeológicos livres, ou seja, o Superior e provavelmente o Barreiras (livre e/ou semiconfinado). Não pode ser feito um estudo do fluxo para o sistema hidrogeológico Pirabas, pela insuficiência de dados, principalmente de poços profundos, além de serem poucos os poços (acima de 50m de profundidade) que alcançam este sistema hidrogeológico.

O mapeamento do fluxo subterrâneo foi realizado em dois momentos distintos: no mês de menor precipitação (setembro) e no de maior precipitação (março). Os objetivos buscados foram: entender melhor o comportamento do fluxo hídrico e indicar possíveis áreas de recarga e descarga do Sistema Hidrogeológico Superior. A partir de medidas do nível estático de 38 poços (Tabela 3) foram construídos dois mapas de fluxo subterrâneo (Figuras 9 e 10). O comportamento da superfície potenciométrica mostrada nos dois mapas (Figura 9 e 10) são semelhantes,

ou seja, o fluxo exibe uma inclinação do centro oeste pra noroeste e leste, acompanhando a inclinação do relevo. Devido a estas semelhanças os gradientes hidráulicos não tiveram inversões, assim como as áreas de recarga e descarga continuaram as mesmas. Mesmo havendo uma diminuição dos valores do nível da água nos poços, devido a baixa precipitação pluviométrica do período não chuvoso, o fluxo permaneceu no sentido das águas subterrâneas para as águas superficiais, ou seja, não houve inversão de fluxo.

Os gradientes hidráulicos, contudo, variam na área, indicando uma mudança de velocidade do fluxo. Na porção noroeste o valor do gradiente varia de 0,0024 a 0,001, já na porção norte o valor é de 0,0035, indicando fluxo mais veloz. Na porção nordeste o valor é de 0,0034, no leste é de 0,0008, fluxo com velocidade menor. No oeste é de 0,0023 velocidade mediana. No centro é de 0,0022, no sudeste é de 0,0018, no sudoeste é de 0,001.

Tabela 3 - Características dos Poços Utilizados para o Mapa de Fluxo Subterrâneo**Table 3** - Characteristics of wells used for the map of groundwater flow

Poço	X(W)	Y(N)	Cota	Nível Estático (Período mais chuvoso- março)	Nível Estático (Período menos chuvoso - setembro)
C01	175113	9877242	41	7	7,5
C02	174019	9878216	39	6	6,4
C03	176620	9875832	43	6,5	7
C04	179736	9875506	46	10	10,7
C05	179485	9873558	35	11	11,7
C06	174126	9876122	47	5	5,8
C07	172054	9876260	43	6,1	6,9
C08	170479	9876592	33	5,6	5,9
C09	174980	9874016	50	8	8,3
C10	172725	9874142	40	3	3,9
C11	174474	9870968	37	2,5	2,6
C12	176558	9870532	42	5	7,6
C13	178774	9868762	38	5,5	7,4
C14	175834	9871158	35	4	4,8
C15	174309	9866238	37	3,7	4,1
C16	175996	9864496	42	5,3	7
C17	178227	9862080	34	1,8	2,1
C18	176558	9860060	37	2,5	3,1
C19	172235	9868374	45	2	2,8
C20	170588	9870044	51	6	6,7
C21	169137	9871258	37	2,8	3,3
C22	166529	9871080	46	4	4,4
C23	164303	9873546	41	7	7,8
C24	166533	9875530	34	3	3,2
C25	168315	9876362	33	2	3,8
C26	164774	9869984	46	0,9	2,8
C27	165302	9868314	46	0,8	2,1
C28	167536	9867714	51	0,8	2,9
C29	170375	9865106	46	1,4	2
C30	171011	9863162	43	4,8	5
C31	171976	9861788	45	8,4	8,8
C32	174319	9860056	51	10,9	10
C33	174165	9863422	41,5	3,4	3,5
C34	175971	9864274	47,5	8	8,7
C35	178980	9861344	38	3,9	5,2
C36	162539	9867568	38,5	2	2,7
C37	165265	9865210	45,5	1,8	2,5
C38	166497	9862334	47	6,7	7,2

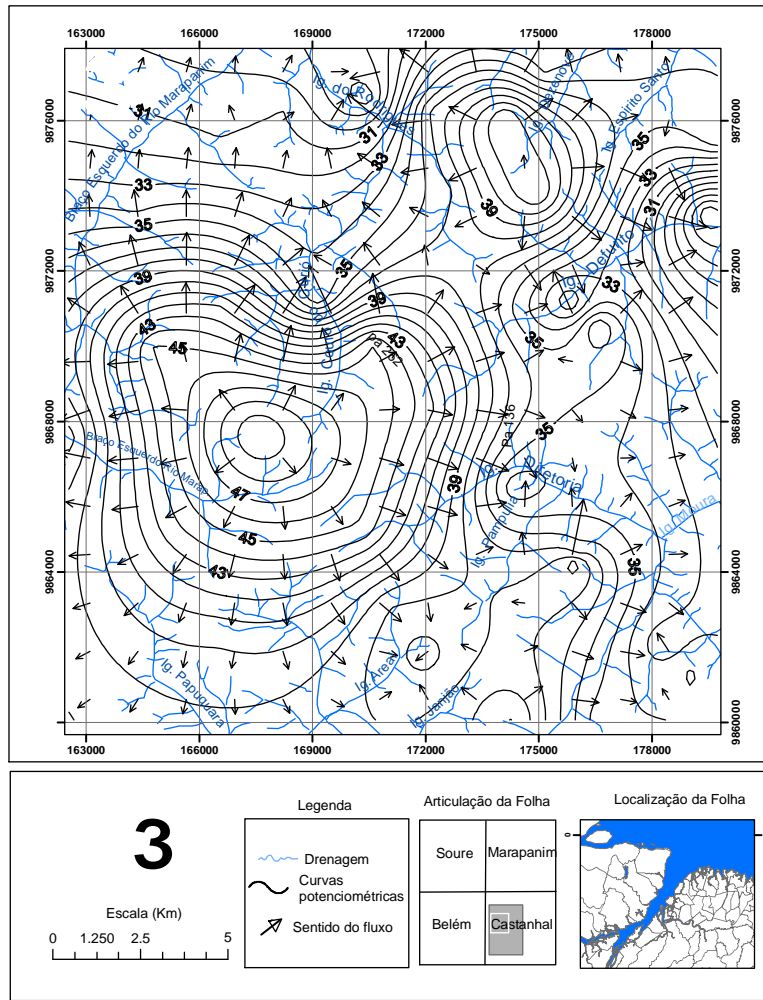


Figura 9 - Mapa de Equipotencial Hidráulico do período mais chuvoso da Folha SA-23 - V - C - I - I - SO.

Figure 9 - Hydraulic equipotential map of the rainiest period of the Sheet SA-23 - V - C - I - I - SO.

Fonte: Bandeira and Abreu (2009)

Source: Bandeira and Abreu (2009)

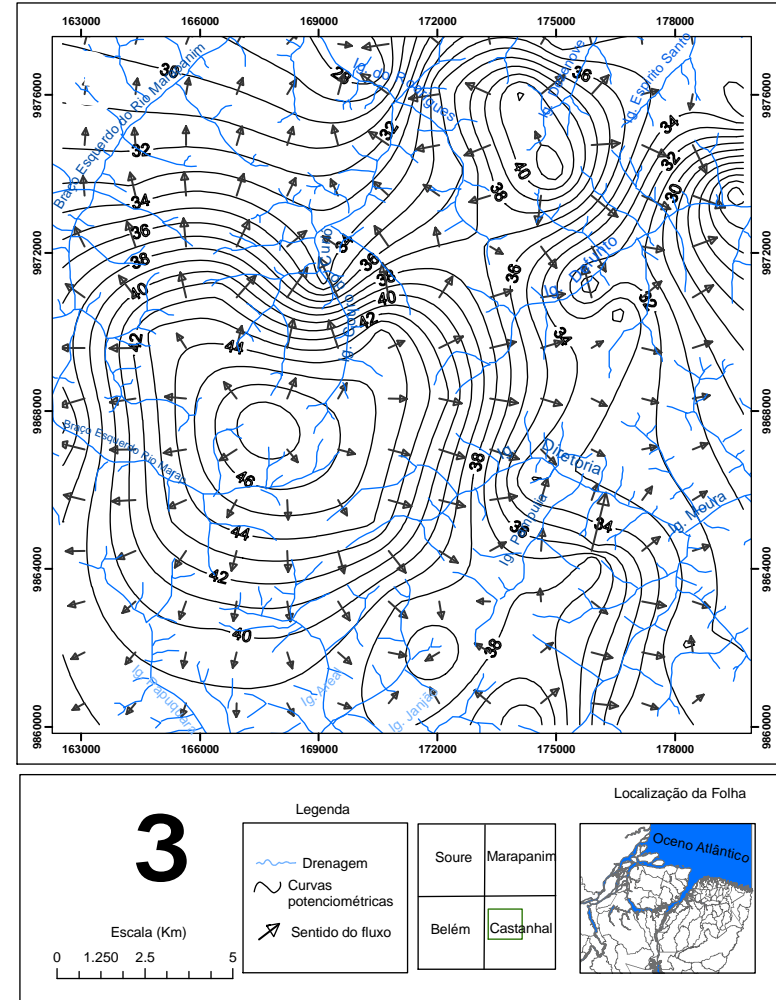


Figura 10 - Mapa de Equipotencial Hidráulico do período menos chuvoso da Folha SA-23 - V - C - I - I - SO.

Figure 10 - Hydraulic equipotential map of the less rainy period of the Sheet SA-23 - V - C - I - I - SO

Fonte: Bandeira and Abreu (2009)

Source: Bandeira and Abreu (2009)

Disso decorrem implicações ambientais, uma vez que as áreas com gradiente hidráulico maior, como na porção norte (próximo ao Igarapé Rodrigues), noroeste (montante do Igarapé couro de Curió) e nordeste (montante do Igarapé espírito Santo) terão processos de dispersão de contaminantes mais rápidos, no caso deles existirem na área.

Os mapas de fluxo subterrâneo do Sistema Hidrogeológico Superior quando analisados no contexto da base física construída para a área estudada (Figura 9 e 10), mostram de forma bastante clara a existência de, pelo menos, duas áreas de recarga do sistema hidrogeológico superior. A região de recarga é caracterizada pelo padrão divergente dos vetores de fluxo, e pode ser observado na porção centro-oeste, nas proximidades do Igarapé Couro do Curió e na porção nordeste do mapa (Figura 9 e 10), próximo ao Igarapé Defunto.

Recarga dos Sistemas Hidrogeológicos

A recarga dos sistemas hidrogeológicos comporta diferentes situações que podem ser assim descritas:

a) A recarga dos sistemas hidrogeológicos livres (Superior e Barreiras) se dá basicamente pela precipitação direta, a partir da água da chuva, na porção centro-oeste da área de estudo, ou seja, nas proximidades do Igarapé Couro do Curió e na porção nordeste próximo ao Igarapé Defunto (Figura 11).

Esta recarga é favorecida pela geologia da área caracterizada por sedimentos permeáveis na parte superior do pacote sedimentar, pelas condições atmosféricas e condicionantes impostos

pela neotectônica;

b) Duas possibilidades podem ser consideradas para a recarga dos sistemas hidrogeológicos confinados (Pirabas) a semi-confinados (Barreiras);

✓ A primeira seria a infiltração a partir das áreas onde essas formações geológicas afloram, situadas distalmente a leste de Castanhal, ou seja, nos municípios de Salinas, São João de Pirabas, Capanema, etc., distantes aproximadamente 70 km da área de estudo. A partir dessas áreas a água migraria, recompondo os volumes de água subterrânea, nos locais de maior para menor carga hidráulica. Uma dificuldade nesse caso seriam os deslocamentos verticais provocados por falhas que interrompem a continuidade lateral das camadas aquíferas, dificultando essa migração.

A segunda possibilidade estaria relacionada a um condicionamento estrutural, no qual a recarga em parte ocorreria diretamente na área de Castanhal, onde a infiltração aconteceria, através dos condutos naturais que seriam as zonas de falhas e fraturas que interceptam as formações geológicas e permitem a conexão hidráulica entre os sistemas hidrogeológicos mais superiores e esses mais profundos (PINHEIRO, 2009).

Dentre essas merecem destaque as posições atrativas que na área são basicamente aquelas orientadas NW-SE, conforme os modelos cinemáticos estabelecidos, os locais de maior favorabilidade de recarga dos sistemas hidrogeológicos. Estas áreas de recarga apresentam compatibilidade às zonas de recarga definidas com base na análise do mapa de fluxo para o sistema hidrogeológico superior (Figura 9 e 10).

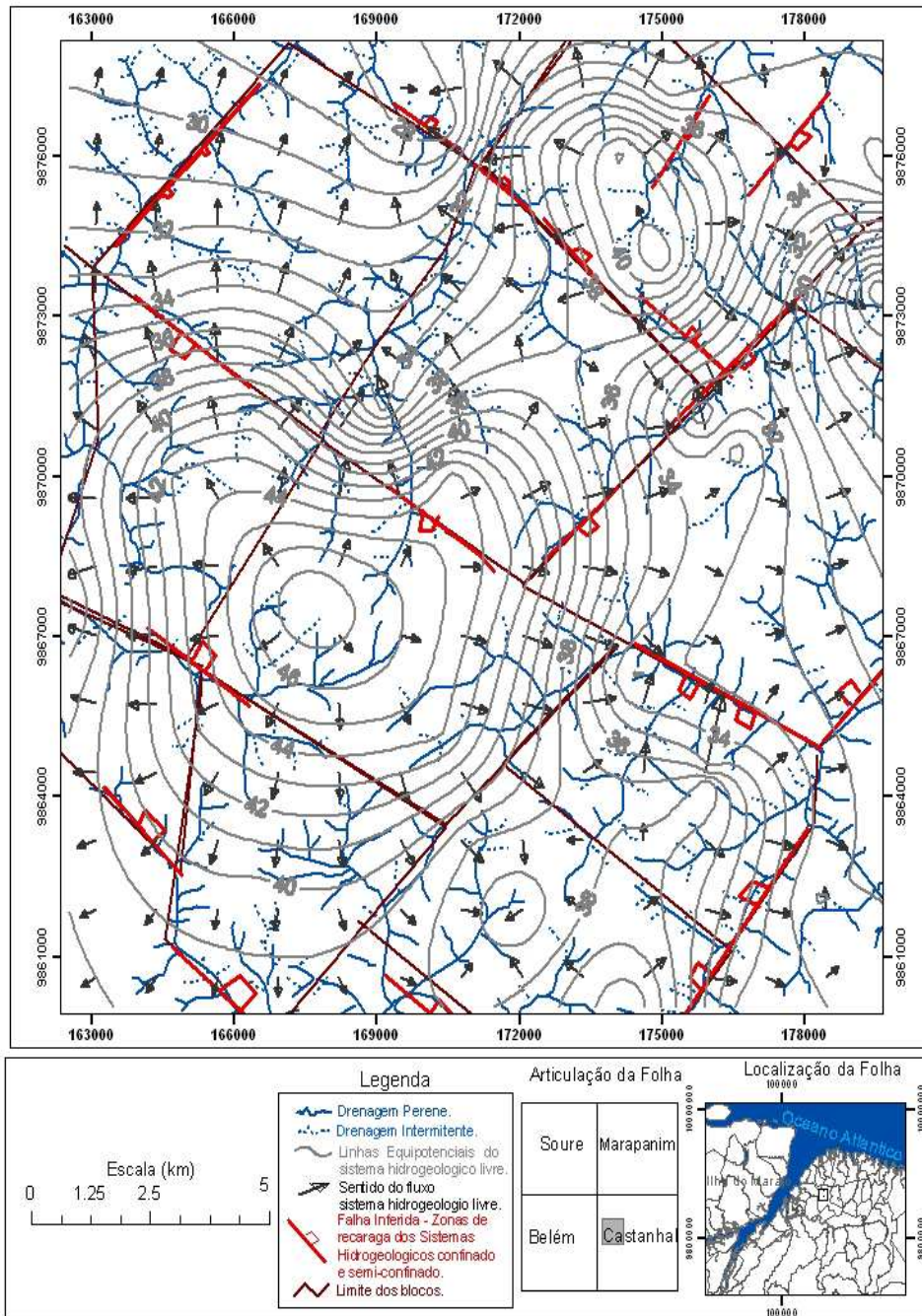


Figura 11 - Mapa das prováveis áreas de recarga da Folha SA-23 – V - C - I -1-SO
Figure 11 - Map of the Sheet SA-23 – V - C - I -1-SO probable recharge areas

Interrelação Neotectônica e Hidrogeologia

A inter-relação entre a geologia, análise morfoestrutural e hidrogeologia, permitiu estabelecer que a área estudada está dentro do contexto neotectônico regional caracterizado por transcorrências, com componente transpressivo NW-SE e transtensivo NE-SW, onde se desenvolveram falhas normais na direção NW-SE com mergulhos no sentido NE (COSTA et al., 1996).

Desta forma a movimentação neotectônica ocorrida na área estudada gerou falhas normais na direção NW-SE, provocando desnivelamento de blocos, responsáveis pela geração de *landforms* tectônicos alinhados segundo duas direções principais: NW-SE e NE-SW. Também foram geradas falhas na direção NE-SW e falhas transcorrentes destrais na direção E-W, comprovadas pelo apare-

cimento de formas anômalas em Z na porção leste dos rios Inhangapi e do rio Marapanim.

Estas falhas impuseram um condicionamento estruturado ao relevo das planícies fluviais, colinas pediplanizadas e colinas de topos aplainados, alinhando-o segundo as direções: N20°-40°W, N60°-70°W, N30°-50°E e N60°-70°E. Assim como condicionou a drenagem, impondo padrões como treliça, retangular e paralelo, e anomalias de drenagens como retilinearidade, aparecimento abrupto e localizado de meandros, estreitamento anômalo de vales ou canais e curvas anômalas.

As falhas normais passaram a interagir com as transcorrentes formando um arranjo alternado de blocos altos e baixos com mergulhos no sentido NE e outros no sentido SW.

Este arranjo em blocos também impôs modificações na configuração geométrica das camadas sedimentares em subsuperfície tais como:

- ✓ Mudanças de atitudes das mesmas, devido aos deslocamentos e basculamentos;

- ✓ Deslocamentos de 8 a 20 m de rejeito vertical colocam lateralmente camadas não tão espessas e de composições diferentes, interrompendo o fluxo subterrâneo e criando obstáculos para o fluxo a partir das áreas de recarga onde as formações afloram. Ou seja, a configuração em blocos gera comportamentos diferenciados para o fluxo hidráulico, condicionando a velocidade do mesmo ao basculamento das camadas, gerando assim superfícies potenciométricas distintas para cada bloco. Portanto, os mapas das superfícies potenciométricas devem ser avaliados com cuidado, levando em consideração cada bloco;

- ✓ O caráter interdigitado das camadas, dificultando a determinação das espessuras saturadas. Sendo assim a estruturação em blocos introduz a necessidade de se estabelecer metodologias de cálculo de reservas subterrâneas, para cada bloco individualmente.

A distribuição das tensões na área, com base nas interpretações dos elementos estruturais identificados, produziram falhas normais de direção NW-SE, caracterizadas como zonas trativas ou superfícies potenciais de menor pressão que:

- ✓ Constituem locais de maior favorabilidade para recarga dos sistemas hidrogeológicos. Logo os sistemas semiconfinados Barreiras e confinado Pirabas mesmo não aflorando na área de estudo,

estão sendo alimentados a partir de águas pluviais e pelas drenagens controladas por essas falhas;

- ✓ Possibilitam a conexão hidráulica entre os sistemas hidrogeológicos. Esta ligação permite que as águas do sistema hidrogeológico livre e menos profundo cheguem até os sistemas semiconfinado Barreiras e confinado Pirabas, provocando mistura das águas, fato confirmado por dados de Paranhos (2008) para a cidade de Belém, distante 56 km da área de estudo. Logo estas zonas constituem áreas potencialmente condutoras tanto de água de boa qualidade, assim como substâncias nocivas a saúde humana, caracterizando-se como zonas vulneráveis aos sistemas hidrogeológicos mais profundos como o Pirabas, considerando o melhor sistema para captação de água de boa qualidade em toda a região nordeste do estado do Pará. Quando atravessam as camadas calcárias trazem a potencialização dos mecanismos de dissolução, justamente por serem áreas de fluxo mais evidente. Daí a grande probabilidade do desenvolvimento de edifícios cársticos.

CONCLUSÕES

As pesquisas, análises e interpretações realizadas neste trabalho permitiram concluir que a metodologia para a interpretação morfoestrutural, baseada na análise dos padrões de drenagem e relevo e o estudo hidrogeológico baseado em dados de sondagens elétricas verticais, e mapeamento do fluxo subterrâneo, possibilitaram mostrar que existe um condicionamento estrutural na área, caracterizado geometricamente por falhas distensivas de direção NW-SE e estruturas E-W, NW-SE e N-S.

A interação entre falhas provocou na área um arranjo geométrico caracterizado por blocos estruturais romboédricos que também foram desníveis por movimentações verticais gerando altos e baixos estruturais, causando modificações nas camadas sedimentares em subsuperfície, favorecendo assim à penetração vertical da água. Isto é, os sistemas semiconfinado (Barreiras) e confinado (Pirabas) estão sendo recarregados *in situ* por meio destas zonas. Já os sistemas hidrogeológicos livres estão sendo recarregados na área de Castanhal, por água da chuva, no período de maior precipitação (janeiro a agosto), principalmente nas porções centro-oeste da área, ou seja, nas proximidades do iga-

rapé Couro do Curió e na porção nordeste próximo ao igarapé Defunto.

Além de possibilitar a recarga dos sistemas hidrogeológicos estas falhas consideradas superfícies de menor pressão facilitam a conexão hidráulica entre as camadas saturadas, ocasionando a mistura das águas dos sistemas hidrogeológicos presentes na área. Disso decorre uma grande preocupação,

pois a contaminação de sistemas mais rasos e livres pode vir a contaminar os sistemas hidrogeológicos mais profundos, devido a essa conexão. Isto implica também a descaracterização de confinamento total do Pirabas, que mesmo considerado estar sobreposto por camadas confinantes (argilas), apresenta conexão hidráulica com o sistema hidrogeológico semi-confinado Barreiras.

REFERÊNCIAS

- ARGENTO, M. S. F. Mapeamento geomorfológico. In: ARGENTO, M. S. **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2001. p. 365-386.
- BANDEIRA, I. C. N.; ABREU, F. de A. M. de. Principais áreas de recarga do sistema hidrogeológico livre, da Folha Sa. 23 - V - C - I -1-SO e suas implicações ambientais. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2009, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: ABAS, 2009.
- BERROCAL, J. et al. **Sismicidade do Brasil**. São Paulo: Esperança; IAG/USP - Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1984. 320p.
- COSTA, J.B.S.; BEMERGUY, R.L.; HASUI, Y.; BORGES, M.S.; FERREIRA JÚNIOR, C.R.P.; BEZERRA, P.E.L.; COSTA, M.L.; FERNANDES, J.M.G. Neotectônica da região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v.4, n. 2, p. 23-44, 1996.
- COSTA, F. R. da. **Influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na Região Metropolitana de Belém**. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica)- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **Bulletin American Association of Petroleum Geologist**, v. 51, n.11, p. 2246-2259, 1967.
- LIMA, E. P.; QUARESMA, J. B.; NÓBREGA, E. A. T. **Modelo de um aterro sanitário para disposição final de resíduos sólidos na cidade de Castanhal e o estudo de impacto ambiental**. Belém: Universidade Federal do Pará/ Núcleo de Meio Ambiente, 1994. 72 p. (Estudo do NUMA 1).
- OLIVEIRA, J. R. (Coord.). **PHRMB - Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e adjacências**. Belém: CRPM, 2003. 1 CD-ROM. (Relatório Final).
- PARANHOS, P. F. **Caracterização hidroquímica dos aquíferos Pirabas na região de Icoaraci-Pa**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica)- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- PINHEIRO, A.V.R. **Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, nordeste do Pará**. 2009. 244 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
- PARÁ. Secretaria Executiva de Transportes. **SIGIEP - Sistema de Informações Geográficas do Estado do Pará**. Belém, 2000. 1 CD ROM.
- SOARES, P.C; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v.16 n. 32, p.71-104, 1976.
- SOUZA JUNIOR, C. M.; QUADROS, M. L. do E. S.; BEZERRA, O. V. **Projeto: relatório final estágio de campo III, município de Castanhal**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1992.
- STEWART, L. S.; HANCOCK, P. L. Neotectonics. In: HANCOCK, P. L. (Ed.). **Continental Deformation**. New York: Pergamon Press, 1994. p. 370-409.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, v. 8 n. 1.b, 1955