



Pós-Graduação em
Geografia, Natureza
e Dinâmica do Espaço



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

TRABALHANDO AS VARIÁVEIS DO MÉTODO GALDIT DE VULNERABILIDADE A INTRUSÃO SALINA NO CURSO INFERIOR DO RIO BACANGA, MARANHÃO, BRASIL

Bruno MARTINS -- PPGeo – UEMA

João Paulo Lobo FERREIRA – LNEC - Portugal

Ediléa Dutra PEREIRA - UFMA

Renata Maria Sousa CASTRO -PPGeo – UEMA

SILUSBA 25 anos



14.º SILUSBA

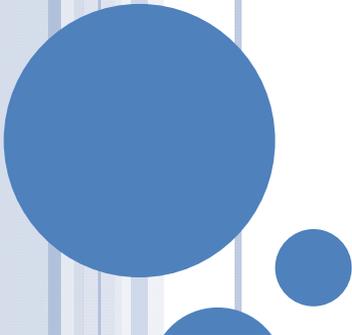
Praia 2019 16 a 20 de setembro





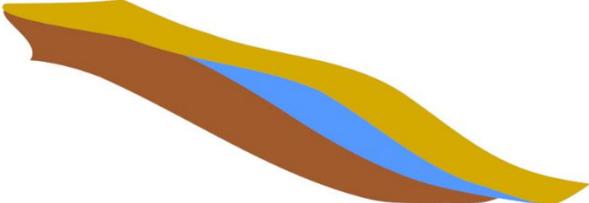
14.ª SILUSBA

COMO CONTROLAR A DEGRADAÇÃO DA
QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
EM ZONAS COSTEIRAS
USANDO A GESTÃO DA RECARGA DE
AQUÍFEROS
OTIMIZADA PELA AVALIAÇÃO DA
VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA
COM OS MODELOS GALDIT E GABA-IFI



12.º SEMINÁRIO  ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS

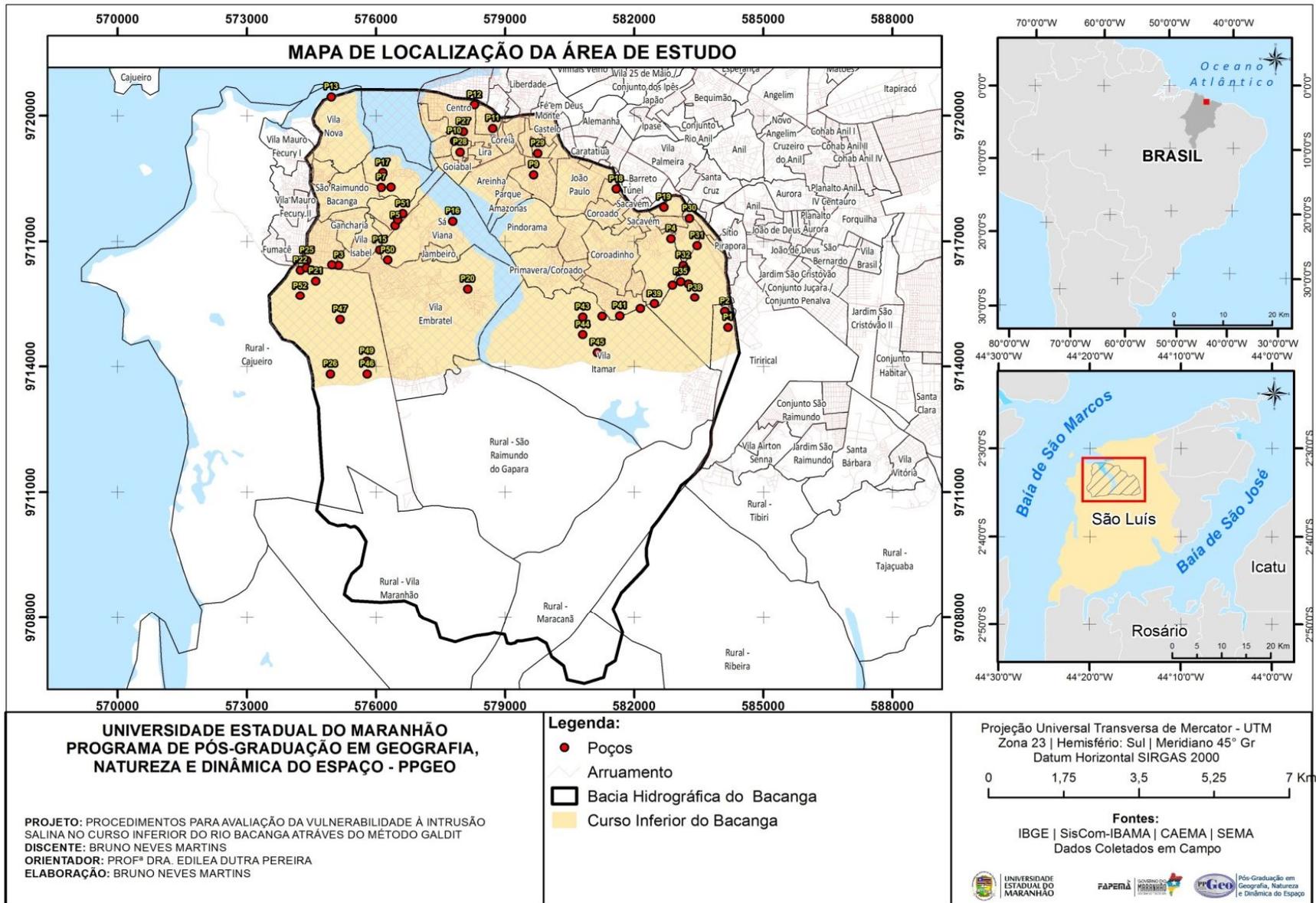
João Paulo LOBO FERREIRA



7 e 8 de março de 2019
Universidade de Coimbra / FCTUC



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA – BACIA DO RIO BACANGA – SÃO LUÍS – MARANHÃO - BRASIL





Rio Bacanga – São Luís – MA - Brasil

MÉTODO GALDIT

(CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001)

Parâmetro GALDIT	Valor do coeficiente de ponderação
G - ocorrência do aquífero	1
A - condutividade hidráulica	3
L - nível do piezômetro	4
D - distância da linha de costa (m)	4
I - impacto do estado atual da intrusão marinha	1
T - espessura do aquífero	2

Groundwater Occurrence (aquifer type; unconfined, confined and leaky confined).

Aquifer Hydraulic Conductivity.

Lheight of Groundwater Level above Sea Level.

Distance from the Shore (distance inland perpendicular from shoreline).

Impact of existing status of seawater intrusion in the area.

Thickness of the aquifer, which is being mapped.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

MÉTODO GALDIT

$$\text{Índice GALDIT} = [(1 \times G) + (3 \times A) + (4 \times L) + (4 \times D) + (1 \times I) + (2 \times T)] / 15$$

VULNERABILIDADE ELEVADA $\geq 7,5$

VULNERABILIDADE MODERADA $5 - 7,5$

VULNERABILIDADE BAIXA ≤ 5

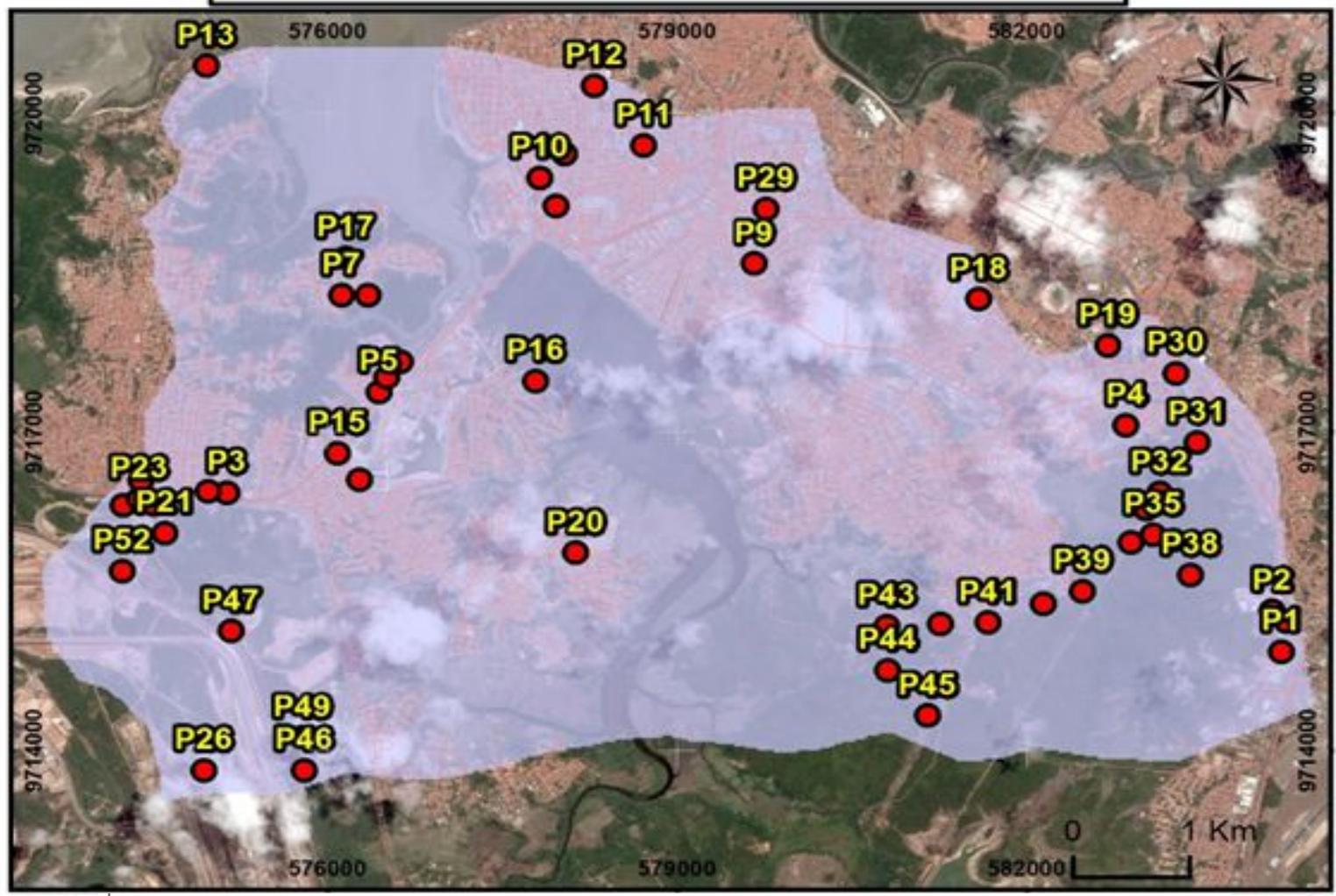
Método GALDIT pelo mundo:

- Aquífero Monte Gordo, Portugal (LOBO FERREIRA et al, 2005);
- Zona costeira de Goa (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2005);
- Bacia hidrográfica do Pindaré (PEREIRA *et al*, 2011);
- Zona de costa da Guiné-Bissau (TERCEIRO e LOBO FERREIRA, 2010);
- Região Costeira da Índia (SATISHKUMAR *et al.* (2016);
- Mediterrâneo (ZAAROUR, 2017);
- e outros.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MÉTODO GALDIT - “G” - OCORRÊNCIA DO AQUÍFERO

- O **aquífero Barreiras** do período Neógeno na bacia do Rio Bacanga é representado por clásticos creme, amarelado e arroxeados reunindo arenitos finos a conglomeráticos, regularmente selecionados, friáveis, angulosos, com nível de lateritas ocasionalmente.
- Constitui um sistema de **aquífero livre**, descontínuo, heterogêneo de boa poro-permeabilidade. Ocorrem nos topos dos tabuleiros e colinas com altitudes aproximadas de 60 a 40 metros na área.
- O **aquífero Itapecuru** apresenta-se na área argila siltosa de coloração cinza e siltito arenoso marrom com argilas esverdeadas.

PARÂMETRO "G" - OCORRÊNCIA DO AQUÍFERO



MAPEAMENTO PARCIAL DOS PARAMETROS DO MÉTODO GALDIT NO BAIXO CURSO DA BACIA DO BACANGA.

Legenda:

- Poços
- ~ Distância
- B. H. Bacanga
- MOSAICO_PLEIADES_08bits.jp2

RGB

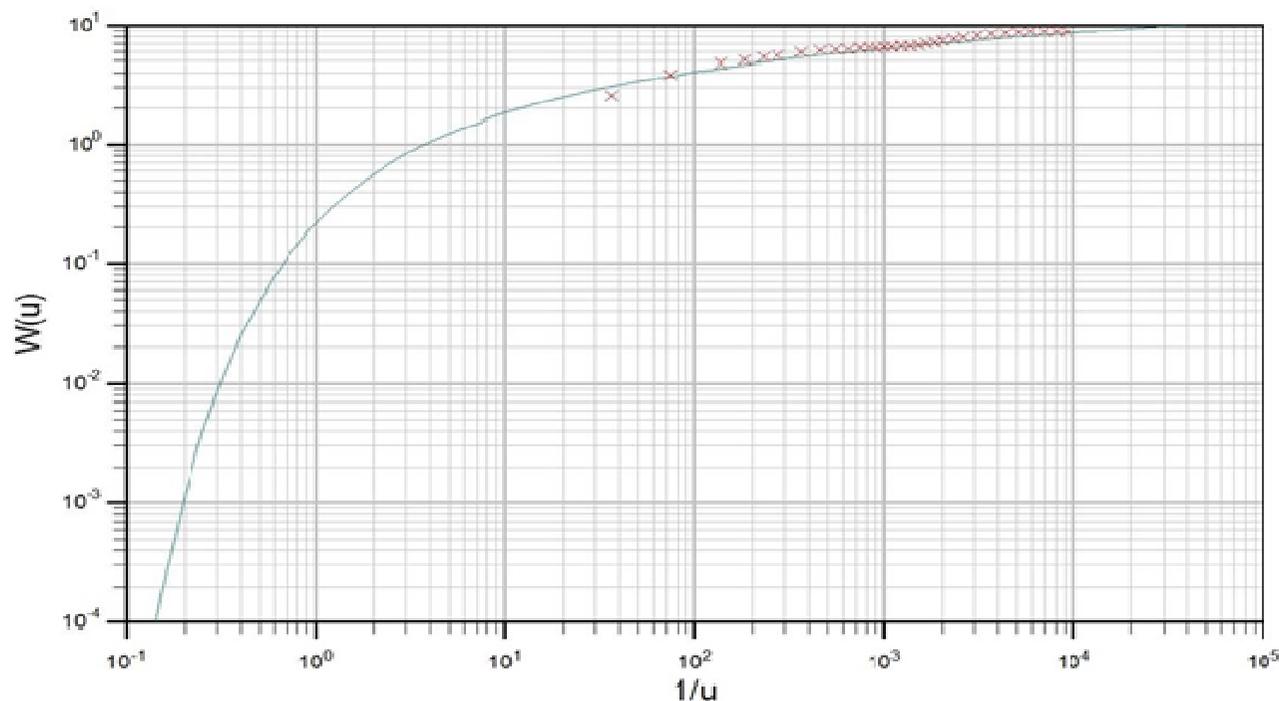
- Red: NONE
- Green: NONE
- Blue: NONE

Parâmetro "G"		Parâmetro "A"		Parâmetro "L"		Parâmetro "D"	
High : 5		High : 2,5		High : 10		High : 10	
Low : 5		Low : 2,5		Low : 2,50		Low : 2,5	
G - ocorrência do aquífero	Valor do índice	A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice	L - nível do piezômetro (intervalo -m)	Valor do índice	D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice
Aquífero Confinado	10	Elevada > 40	10	Elevada < 1	10	Muito perto < 500	10
Aquífero Livre	7,5	Média 10 - 40	7,5	Média 1 - 1,5	7,5	Perto 500 - 750	7,5
Aquífero Semi-confinado	5	Baixa 5 - 10	5	Baixa 1,5 - 2	5	Meta distância 750 - 1000	5
Aquífero Limitado	2,5	Muito baixa < 5	2,5	Muito baixa > 2	2,5	Longe > 1000	2,5



AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MÉTODO GALDIT - "I"

Theis



Quadro 9- Variáveis do poço 25 (P25) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

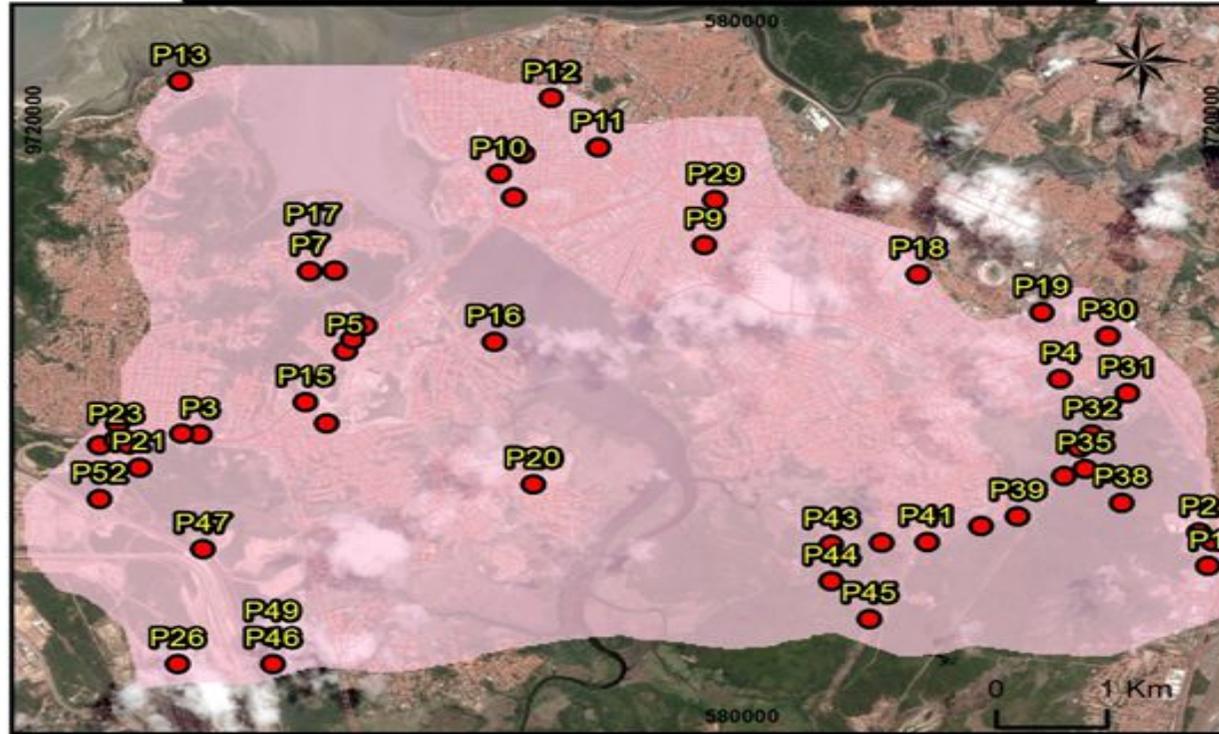
$T(\text{m}^2/\text{min.}) * 60 * 24$	K ($k=T/B$)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m^3/h)
28,8	1,20	0,283	23,96	12,93
Descrição	$K= 1,38 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ Material: (Silte Arenoso, Areia Fina); $N= 10\text{-}20\%$; Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado). $S= 2,8 \times 10^{-2}$			



Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do método GALDIT - “A” Condutividade Hidráulica

- Para caracterização deste parâmetro, utilizou-se o teste de bombeamento de 06 poços tubulares. Conforme a curva de Theis (1963) obtida através do *Aquifer test* indicaram que a condutividade hidráulica variou de $1,27 \times 10^{-7}$ m/s a $3,86 \times 10^{-6}$ m/s nas rochas da Formação Itapecuru indicando baixa a moderada permeabilidade.
- Desta forma, por apresentar Condutividade Hidráulica < 5 , será atribuída o valor 2,5 e fator de ponderação 3.

PARÂMETRO "A" - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA



PARÂMETRO "D" - DISTÂNCIA DA LINHA DE COSTA



MAPEAMENTO PARCIAL DOS PARAMETROS DO MÉTODO GALDIT NO BAIXO CURSO DA BACIA DO BACANGA.

Legenda:

- Poços (Piezometers)
- Distância (Distance)
- B. H. Bacanga

MOSAICO_PLEIADES_08bits.jp2

RGB

- Red: NONE
- Green: NONE
- Blue: NONE

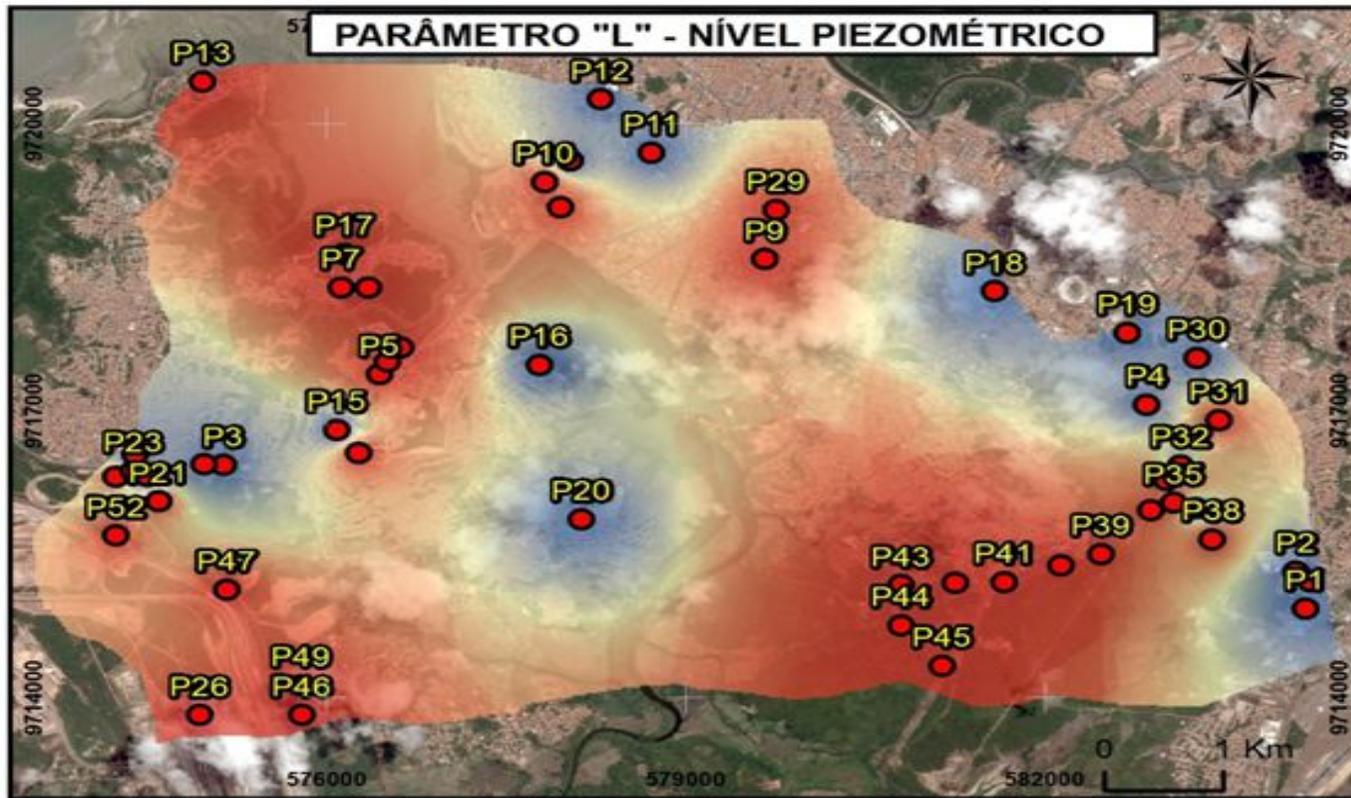
Parâmetro "G"		Parâmetro "A"		Parâmetro "L"		Parâmetro "D"	
High : 5		High : 2,5		High : 10		High : 10	
Low : 5		Low : 2,5		Low : 2,50		Low : 2,5	
G - ocorrência de aquífero	Valor do índice	A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice	L - nível do piezômetro (intervalo -m)	Valor do índice	D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice
Aquífero Confinado	10	Elevada > 40	10	Elevada < 1	10	Muito perto < 500	10
Aquífero Livre	7,5	Média 10 - 40	7,5	Média 1 - 1,5	7,5	Peço 500 - 750	7,5
Aquífero Semi-confinado	5	Baixa 5 - 10	5	Baixa 1,5 - 2	5	Meia distância 750 - 1000	5
Aquífero Limitado	2,5	Muito baixa < 5	2,5	Muito baixa > 2	2,5	Longe > 1000	2,5



AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MÉTODO GALDIT - “L” NÍVEL PIEZOMÉTRICO

- O nível piezométrico se refere ao nível de água subterrânea medida em relação ao nível do mar. É um parâmetro importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina.
- Na área a variação do Nível Piezométrico ocorre de +44,2 m a -38,5 m indicando o valor do parâmetro L o índice de 2,5 a 7,5, conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).





MAPEAMENTO PARCIAL DOS PARAMETROS DO MÉTODO GALDIT NO BAIXO CURSO DA BACIA DO BACANGA.

Legenda:	Parâmetro "G"	Parâmetro "A"	Parâmetro "L"	Parâmetro "D"																																								
● Poços	High : 5	High : 2,5	High : 10	High : 10																																								
~ Distância	Low : 5	Low : 2,5	Low : 2,50	Low : 2,5																																								
□ B. H. Bacanga																																												
MOSAICO_PLEIADES_08bits.jp2																																												
RGB																																												
Red: NONE																																												
Green: NONE																																												
Blue: NONE																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>G - ocorrência do aquífero</th> <th>Valor do índice</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aquífero Confinado</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Aquífero Livre</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>Aquífero Semi-confinado</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Aquífero Limitado</td> <td>2,5</td> </tr> </tbody> </table>	G - ocorrência do aquífero	Valor do índice	Aquífero Confinado	10	Aquífero Livre	7,5	Aquífero Semi-confinado	5	Aquífero Limitado	2,5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>A - condutividade hidráulica (m/dia)</th> <th>Valor do índice</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Elevada > 40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Média 10 - 40</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>Baixa 5 - 10</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Muito baixa < 5</td> <td>2,5</td> </tr> </tbody> </table>	A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice	Elevada > 40	10	Média 10 - 40	7,5	Baixa 5 - 10	5	Muito baixa < 5	2,5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>L - nível do piezômetro/ (Intervalo - m)</th> <th>Valor do índice</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Elevada < 1</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Média 1 - 1,5</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>Baixa 1,5 - 2</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Muito baixa > 2</td> <td>2,5</td> </tr> </tbody> </table>	L - nível do piezômetro/ (Intervalo - m)	Valor do índice	Elevada < 1	10	Média 1 - 1,5	7,5	Baixa 1,5 - 2	5	Muito baixa > 2	2,5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>D - distância da linha de costa (m)</th> <th>Valor do índice</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muito perto < 500</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Perto 500 - 750</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>Meia distância 750 - 1000</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Longe > 1000</td> <td>2,5</td> </tr> </tbody> </table>	D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice	Muito perto < 500	10	Perto 500 - 750	7,5	Meia distância 750 - 1000	5	Longe > 1000	2,5
G - ocorrência do aquífero	Valor do índice																																											
Aquífero Confinado	10																																											
Aquífero Livre	7,5																																											
Aquífero Semi-confinado	5																																											
Aquífero Limitado	2,5																																											
A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice																																											
Elevada > 40	10																																											
Média 10 - 40	7,5																																											
Baixa 5 - 10	5																																											
Muito baixa < 5	2,5																																											
L - nível do piezômetro/ (Intervalo - m)	Valor do índice																																											
Elevada < 1	10																																											
Média 1 - 1,5	7,5																																											
Baixa 1,5 - 2	5																																											
Muito baixa > 2	2,5																																											
D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice																																											
Muito perto < 500	10																																											
Perto 500 - 750	7,5																																											
Meia distância 750 - 1000	5																																											
Longe > 1000	2,5																																											

Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do método GALDIT - “D” Distância da Linha de Costa (metros)

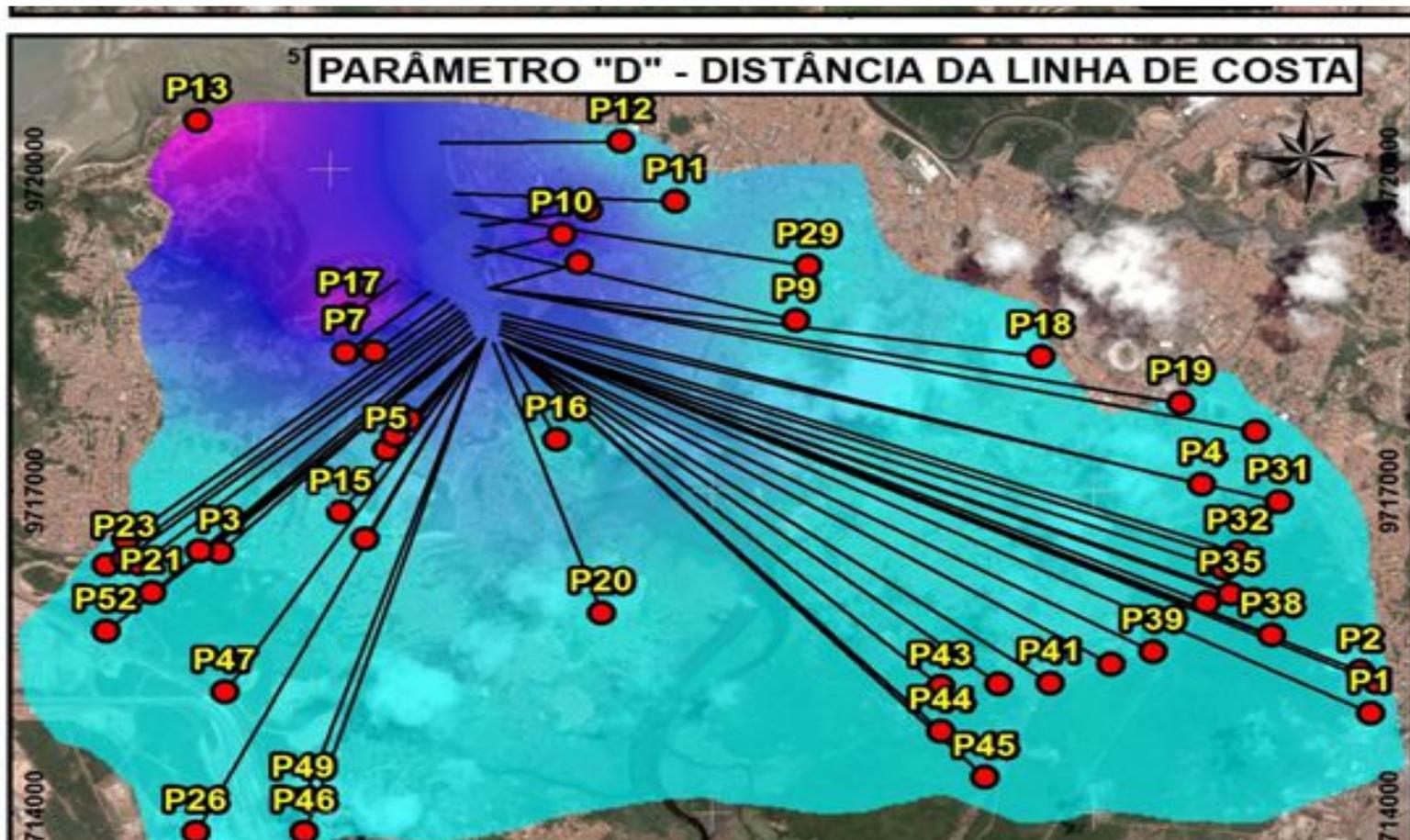
- A distância da linha de costa se refere à distância em metros, em linha reta, do poço tubular em relação ao nível do mar. É um parâmetro que permite determinar avaliar a maior ou menor influência da maré em relação aos poços tubulares estudados.
- Na área a **variação da linha de costa ocorre de 119 m (P-13) a 7.708,9 m** indicando o valor do parâmetro D o índice de 2,5 a 7,5 e 10 conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do método GALDIT - “I”

Para a avaliação deste parâmetro, foi realizada a coleta de água de 06 (seis) poços tubulares, além de dados de poços preexistentes em no banco de dados da pesquisa, visando desta forma, avaliar os quantitativos de cloretos e bicarbonatos presentes em cada amostra.

I – impacto do estado atual da intrusão marinha na região (CI-/[HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻]) na água doce		Valor do índice
Alta	> 2	10
Média	1,5 – 2	7,5
Baixa	1 - 1,5	5
Muito baixa	< 1	2,5



MAPEAMENTO PARCIAL DOS PARAMETROS DO MÉTODO GALDIT NO BAIXO CURSO DA BACIA DO BACANGA.

Legenda:

- Poços
- Distância
- B. H. Bacanga

MOSAICO_PLEIADES_08bits.jp2

RGB

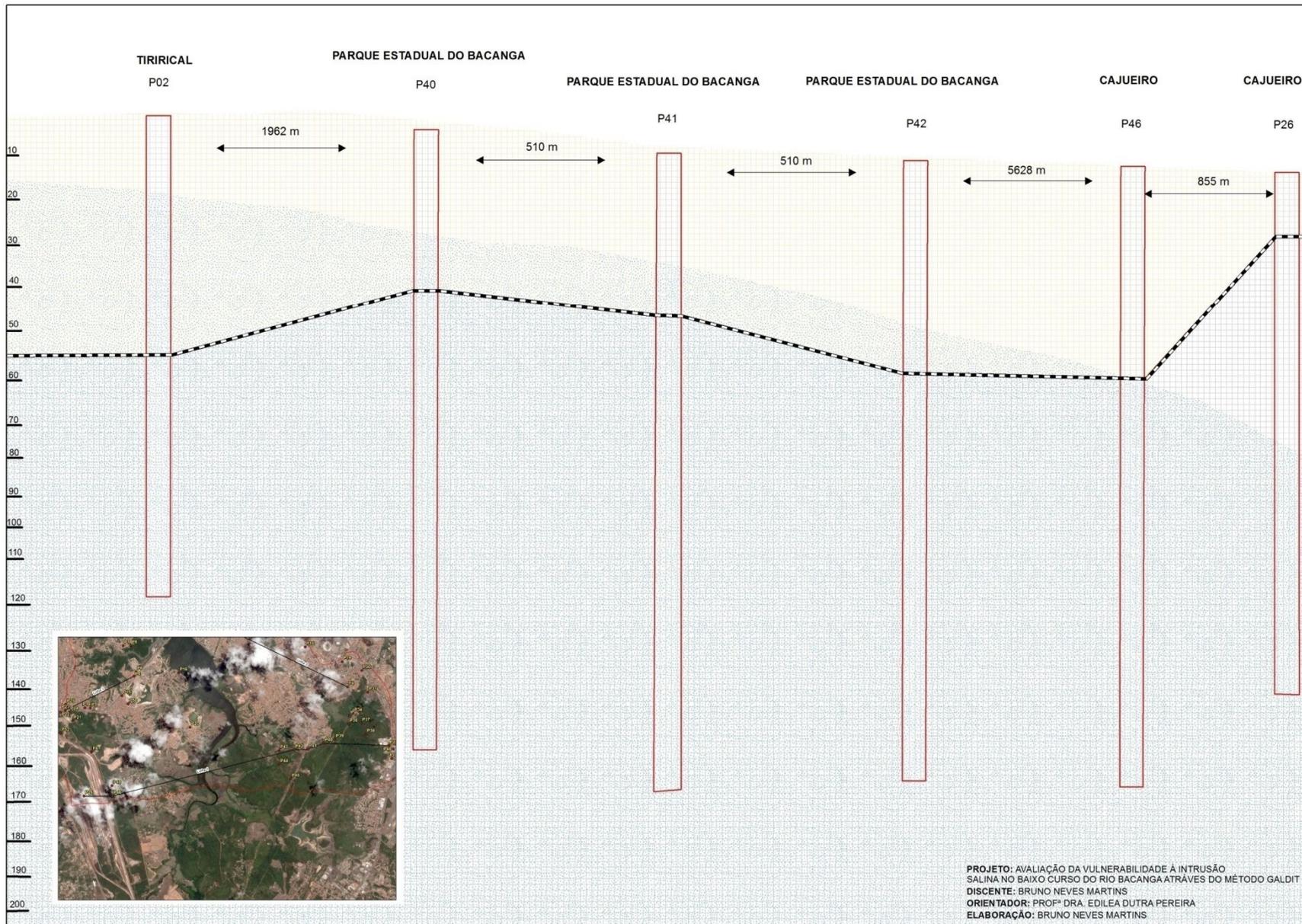
- Red: NONE
- Green: NONE
- Blue: NONE

Parâmetro "G"		Parâmetro "A"		Parâmetro "L"		Parâmetro "D"	
High : 5		High : 2,5		High : 10		High : 10	
Low : 5		Low : 2,5		Low : 2,50		Low : 2,5	
G - ocorrência do aquífero	Valor do índice	A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice	L - nível do piezômetro/ (intervalo -m)	Valor do índice	D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice
Aquífero Confinado	10	Elevada > 40	10	Elevada < 1	10	Muito perto < 500	10
Aquífero Livre	7,5	Média 10 - 40	7,5	Média 1 - 1,5	7,5	Perto 500 - 750	7,5
Aquífero Semi-confinado	5	Baixa 5 - 10	5	Baixa 1,5 - 2	5	Meia distância 750 - 1000	5
Aquífero Limitado	2,5	Muito baixa < 5	2,5	Muito baixa > 2	2,5	Longe > 1000	2,5

Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do método GALDIT - “T” - Espessura do Aquífero

- As características litológicas e espessura dos aquíferos Barreiras e Itapecuru foram analisadas a partir dos dados de perfis litológicos A-B, de 12 (doze) poços tubulares.
- A maior espessura do aquífero Barreiras na bacia atinge aproximadamente 55 metros na área do tabuleiro do Tirirical, diminuindo em direção ao Cajueiro (Figura 29). O contato com o Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa.





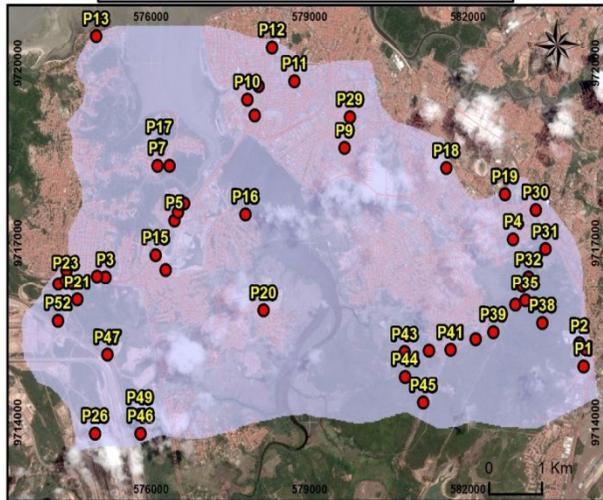
PROJETO: AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO
 SALINA NO BAIXO CURSO DO RIO BACANGA ATRÁVES DO MÉTODO GALDIT
 DISCENTE: BRUNO NEVES MARTINS
 ORIENTADOR: PROFª DRA. EDILEA DUTRA PEREIRA
 ELABORAÇÃO: BRUNO NEVES MARTINS

MODELO DE INTERPOLAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS DAS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS

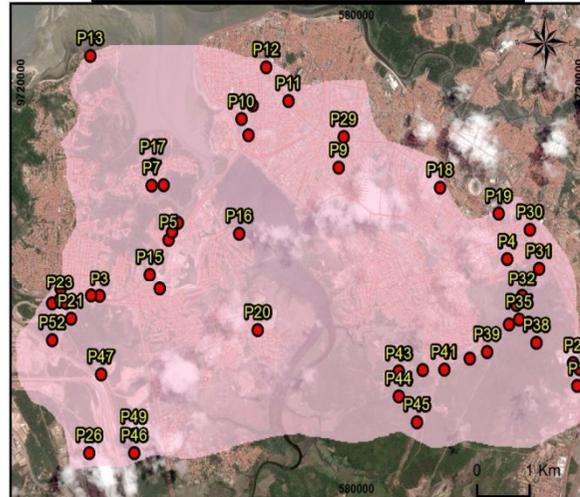
- Para fazer isso, começa-se com um conjunto de medidas conhecidas e, usando método de interpolação, se estima os valores desconhecidos para a área.
- Dentre os métodos de interpolação tem-se o modelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW) considera o conceito de autocorrelação espacial.
- A Krigagem aplica sofisticados métodos estatísticos que consideram as características únicas de seus conjuntos de dados, medindo distância entre todos os possíveis pares de pontos, utilizando a informação para modelar a autocorreção espacial para a superfície particular que se deseja interpolar.



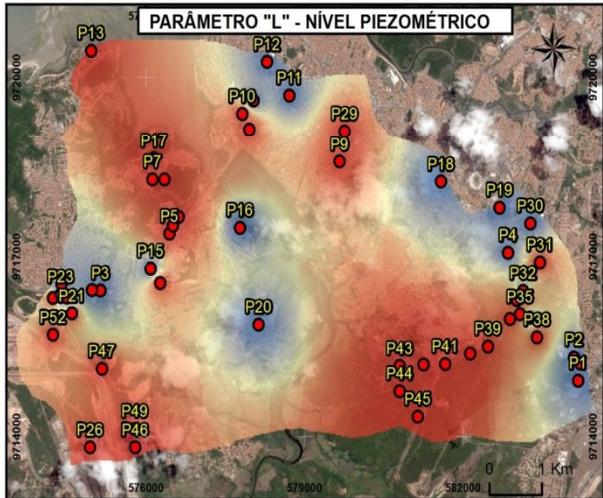
PARÂMETRO "G" - OCORRÊNCIA DO AQUIFERO



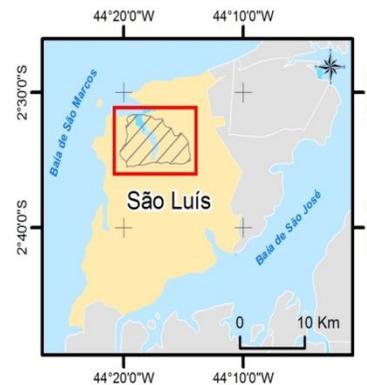
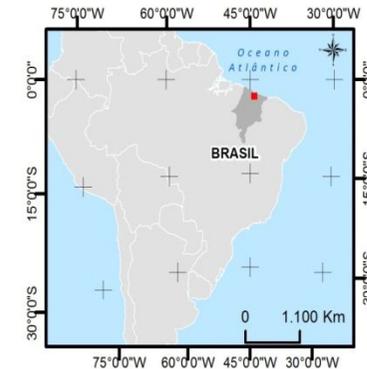
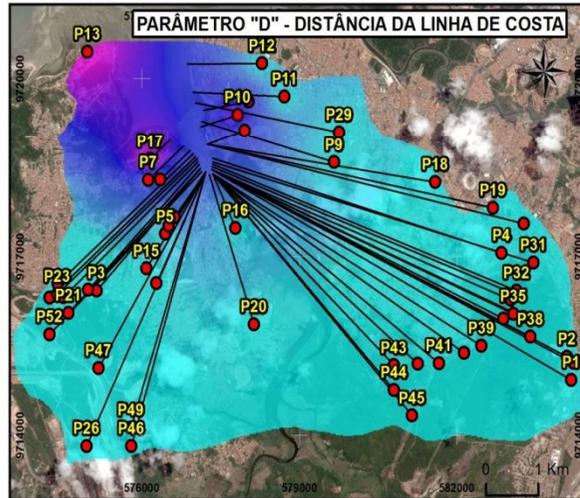
PARÂMETRO "A" - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA



PARÂMETRO "L" - NÍVEL PIEZOMÉTRICO



PARÂMETRO "D" - DISTÂNCIA DA LINHA DE COSTA



Projeção Universal Transversa de Mercator - UTM
Zona 23 | Hemisfério: Sul | Meridiano 45° Gr
Datum Horizontal SIRGAS 2000

Fontes:
IBGE | SisCom-IBAMA | CAEMA | SEMA
Dados Coletados em Campo



Pós-Graduação em
Geografia, Natureza
e Dinâmica do Espaço

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA,
NATUREZA E DINÂMICA DO ESPAÇO - PPGEO

MAPEAMENTO PARCIAL DOS PARAMETROS DO MÉTODO GALDIT NO BAIXO CURSO DA BACIA DO BACANGA.

Legenda:

- Poços
- Distância
- B. H. Bacanga

MOSAICO_PLEIADES_08bits.jp2

RGB

- Red: NONE
- Green: NONE
- Blue: NONE

Parâmetro "G"		Parâmetro "A"		Parâmetro "L"		Parâmetro "D"		
High : 5		High : 2,5		High : 10		High : 10		
Low : 5		Low : 2,5		Low : 2,50		Low : 2,5		
G - ocorrência do aquífero	Valor do índice	A - condutividade hidráulica (média)	Valor do índice	L - nível do piezômetro/ (intervalo -m)	Valor do índice	D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice	
Aquífero Confinado	10	Elevada	> 40	10	Elevada	< 1	10	
Aquífero Livre	7,5	Média	10 - 40	7,5	Média	1 - 1,5	7,5	
Aquífero Semi-confinado	5	Baixa	5 - 10	5	Baixa	1,5 - 2	5	
Aquífero Limitado	2,5	Muito baixa	< 5	2,5	Muito baixa	> 2	2,5	
						Muito perto	< 500	10
						Perto	500 - 750	7,5
						Méda distância	750 - 1000	5
						Longe	> 1000	2,5

PROJETO: PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NO CURSO INFERIOR DO RIO BACANGA ATRÁVES DO MÉTODO GALDIT
DISCENTE: BRUNO NEVES MARTINS
ORIENTADOR: PROFª DRA. EDILEA DUTRA PEREIRA
ELABORAÇÃO: BRUNO NEVES MARTINS

CONCLUSÕES

- O método GALDIT, apresentou-se como uma ferramenta completa e fundamental para a avaliação da vulnerabilidade à intrusão salina em aquíferos costeiros, isso foi possível, graças as suas variantes que permitem uma análise minuciosa do aquífero estudado, como por exemplo, os coeficientes K; S; T que demonstram um diagnóstico da área de estudo, assim como os dados de análises físicos-químicos dos poços tubulares.
- **A conjugação dos conhecimentos da hidrogeologia com o geoprocessamento dos dados auxiliam no entendimento do comportamento da cunha salina, o que permite uma visão holística do fenômeno.**
- Assim como em outros métodos que visam avaliar a vulnerabilidade do aquífero, o modelo de interpolação espacial a ser utilizado ainda é uma questão a ser debatida, uma vez que o modelo geomatemático a ser utilizado influencia significativamente no resultado do método. O estudo possibilitou a análise de um fenômeno silencioso, mas presente diuturnamente, por se tratar de um ambiente sensível e com uma exploração de água subterrânea constante.

AGRADECIMENTOS

- À FAPEMA, pelo auxílio concedido à pesquisa durante certo período e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço – PPGeo da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA
- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC – Lisboa – Portugal.



REFERÊNCIAS

- CHACHADI, A.G. Seawater Intrusion Mapping Using Modified GALDIT Indicator Model-Case Study in Goa. Jalvigyan Sameeksha, 20, 2005.
- _____; LOBO-FERREIRA, J.P. Sea Water Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using GALDIT Method. Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai, 143-156, 2001.
- PEREIRA, E. D. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do reservatório Batatã - São Luís (MA). 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006



SILUSBA 25 anos

14.ª SILUSBA

Praia 2019 16 a 20 de setembro



Obrigado pela vossa atenção !