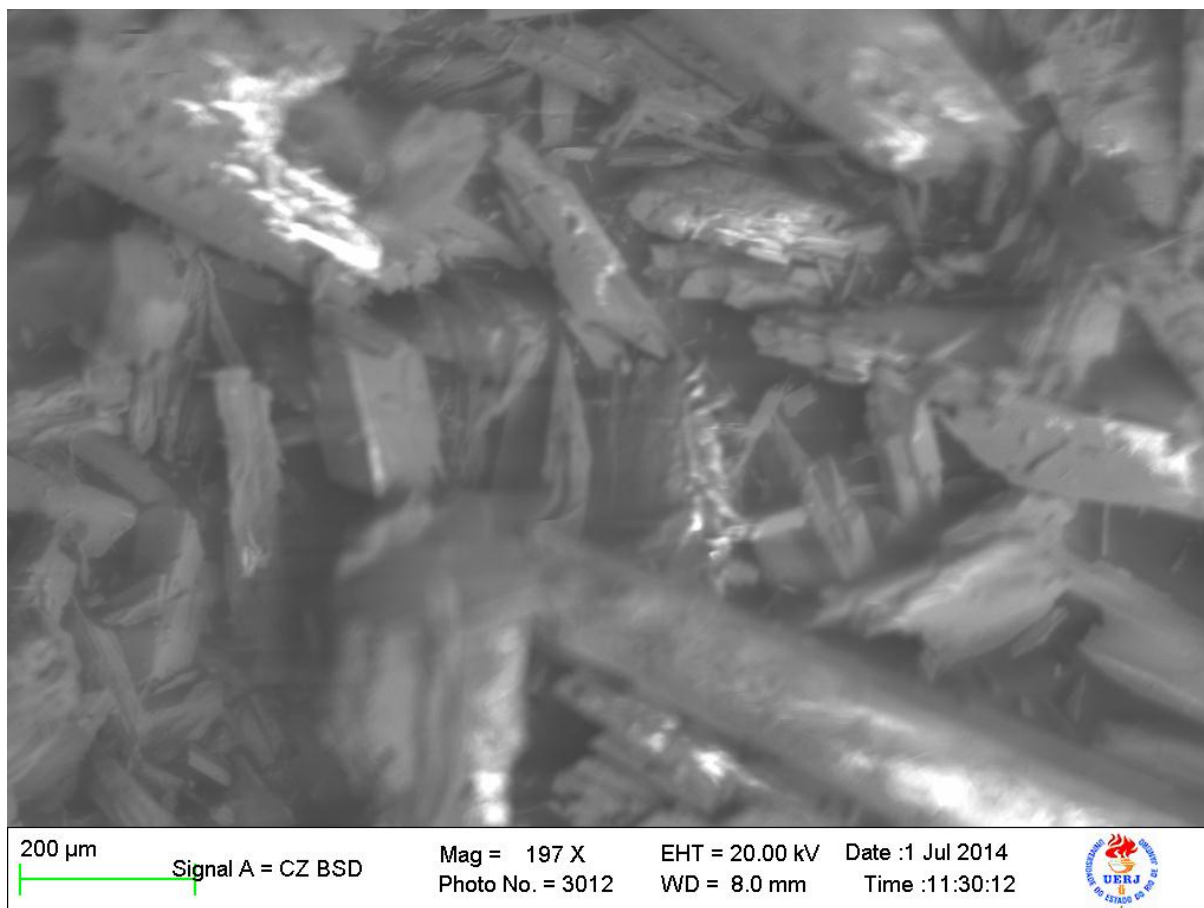


#### 4.7.4- Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 3

Figura 85 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 197 X Zona 3



Fonte: O autor, 2014

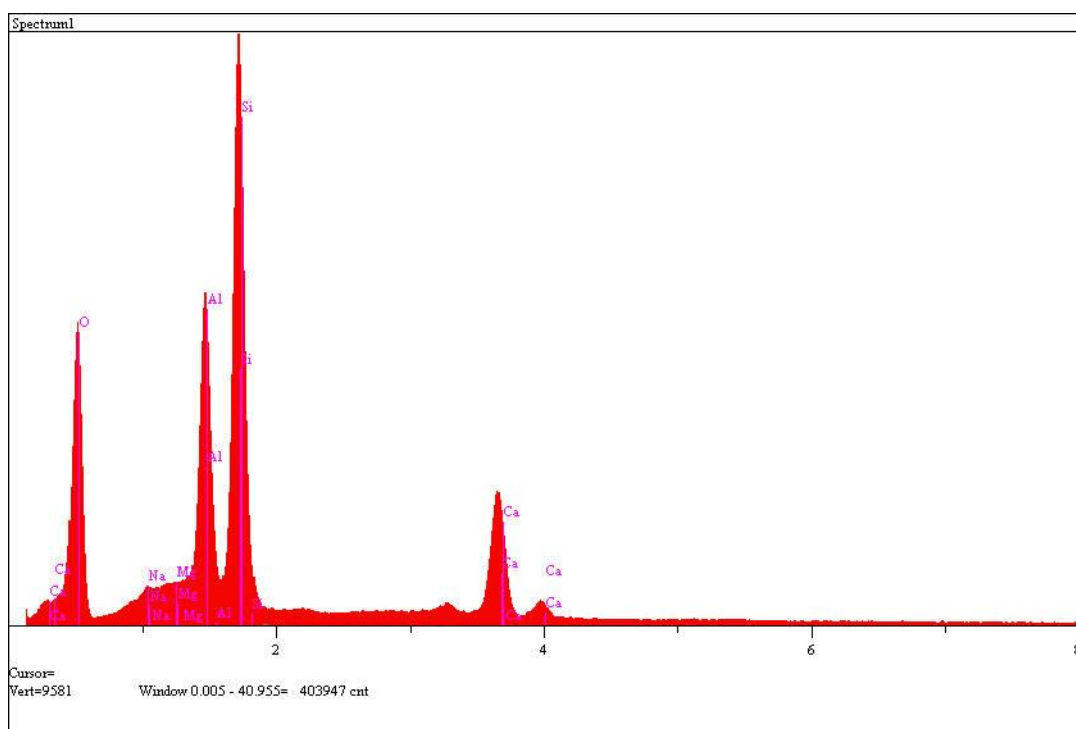
Tabela 43 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 3

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	2.188	O	656.31	6.614	0.000
Si	56.091	Na	63.25	2.053	2.510
Ca	14.800	Mg	68.60	2.138	2.188
Na	2.510	Al	777.65	7.200	24.410
Al	24.410	Si	1382.31	9.599	56.091
O	0.000	Ca	310.72	4.551	14.800
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

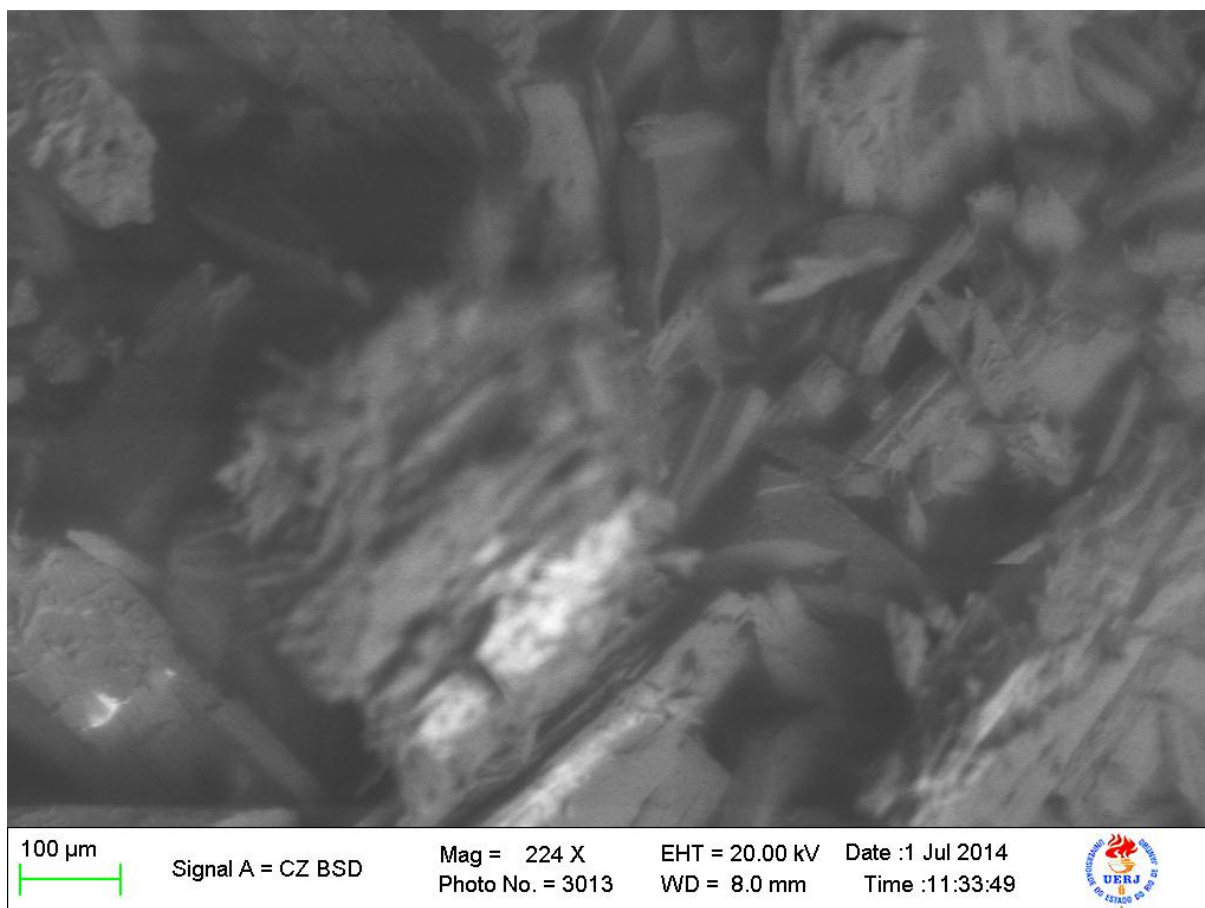
Figura 86 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 3



Fonte: O autor, 2014.

#### 4.7.5- Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 4

Figura 87 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 224 X Zona 4



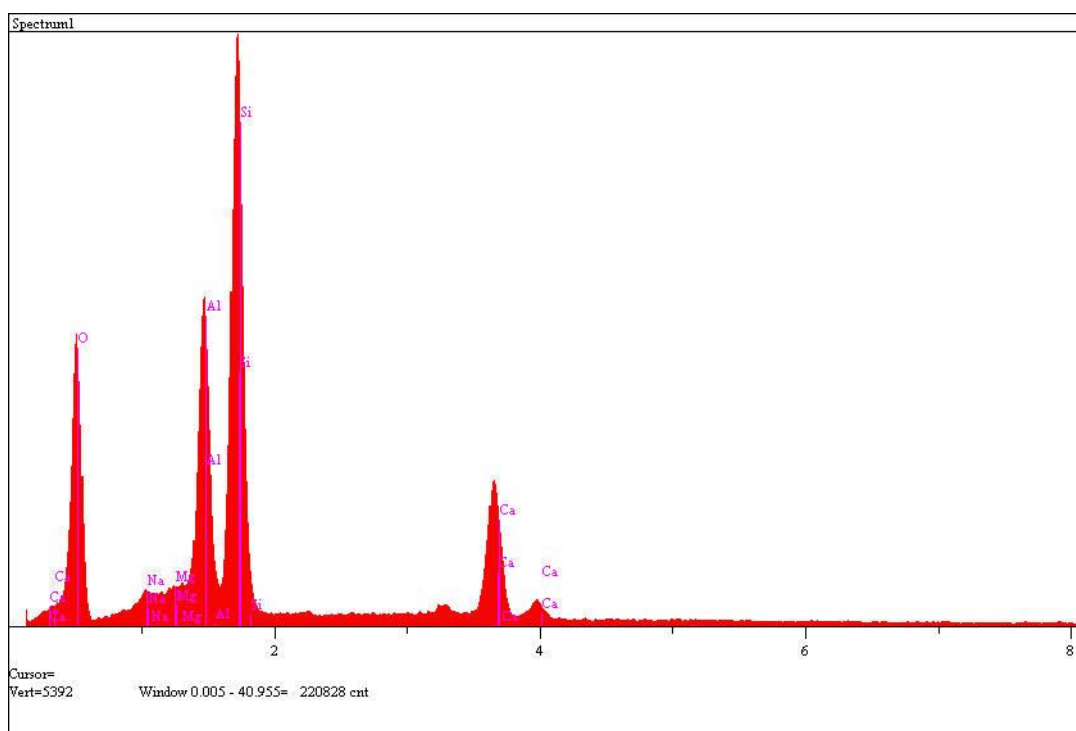
Fonte: O autor, 2014

Tabela 44 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 4

Oxidos	Concentração		Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	1.725		O	341.34	4.770	0.000
Si	56.153		Na	26.63	1.332	1.962
Ca	15.955		Mg	29.54	1.403	1.725
Na	1.962		Al	423.56	5.313	24.205
Al	24.205		Si	759.30	7.114	56.153
O	0.000		Ca	182.70	3.490	15.955
<b>Total</b>	<b>100.000</b>				<b>Total</b>	<b>100</b>
/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/						

Fonte: O autor, 2014

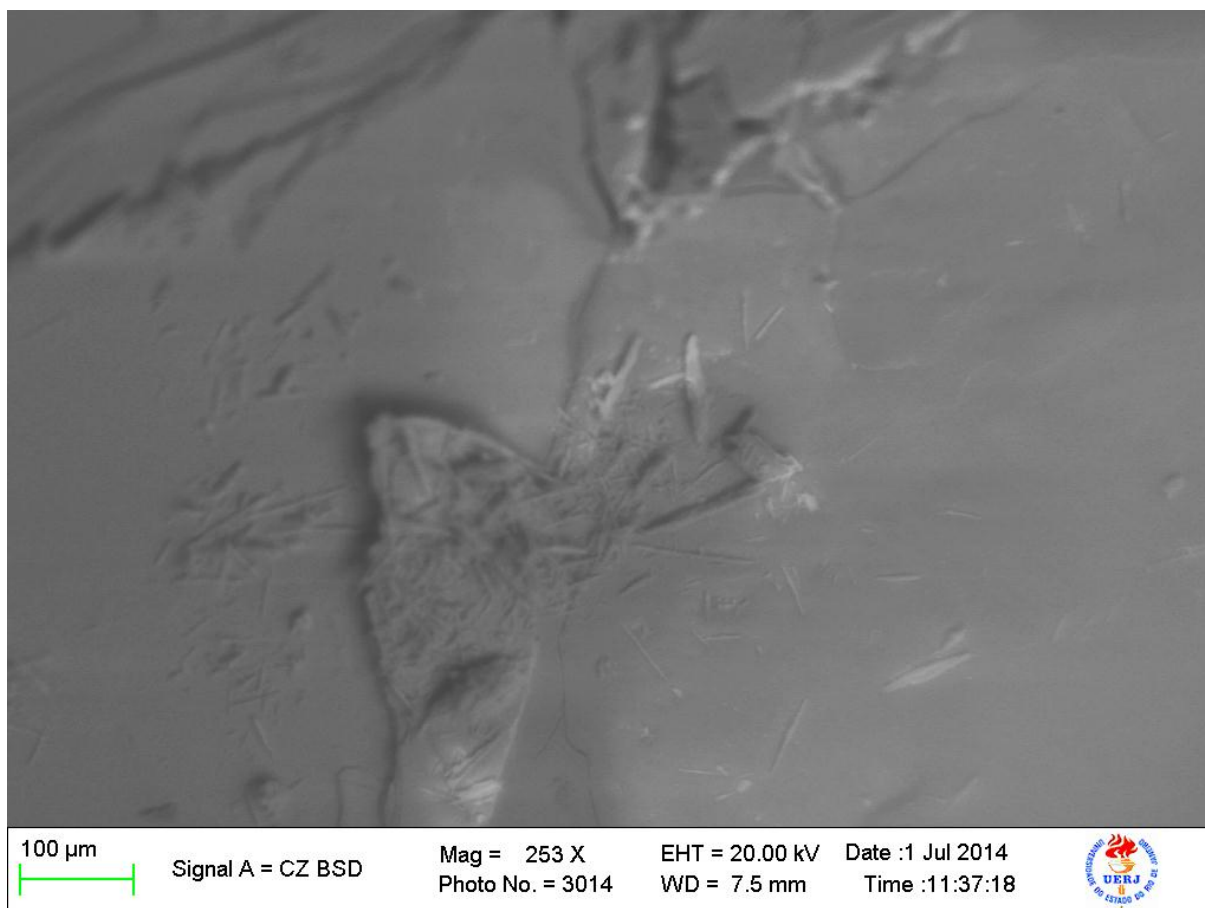
Figura 88 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 4



Fonte: O autor, 2014

4.7.6 Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 5

Figura 89 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 253 X Zona 5



Fonte: O autor, 2014

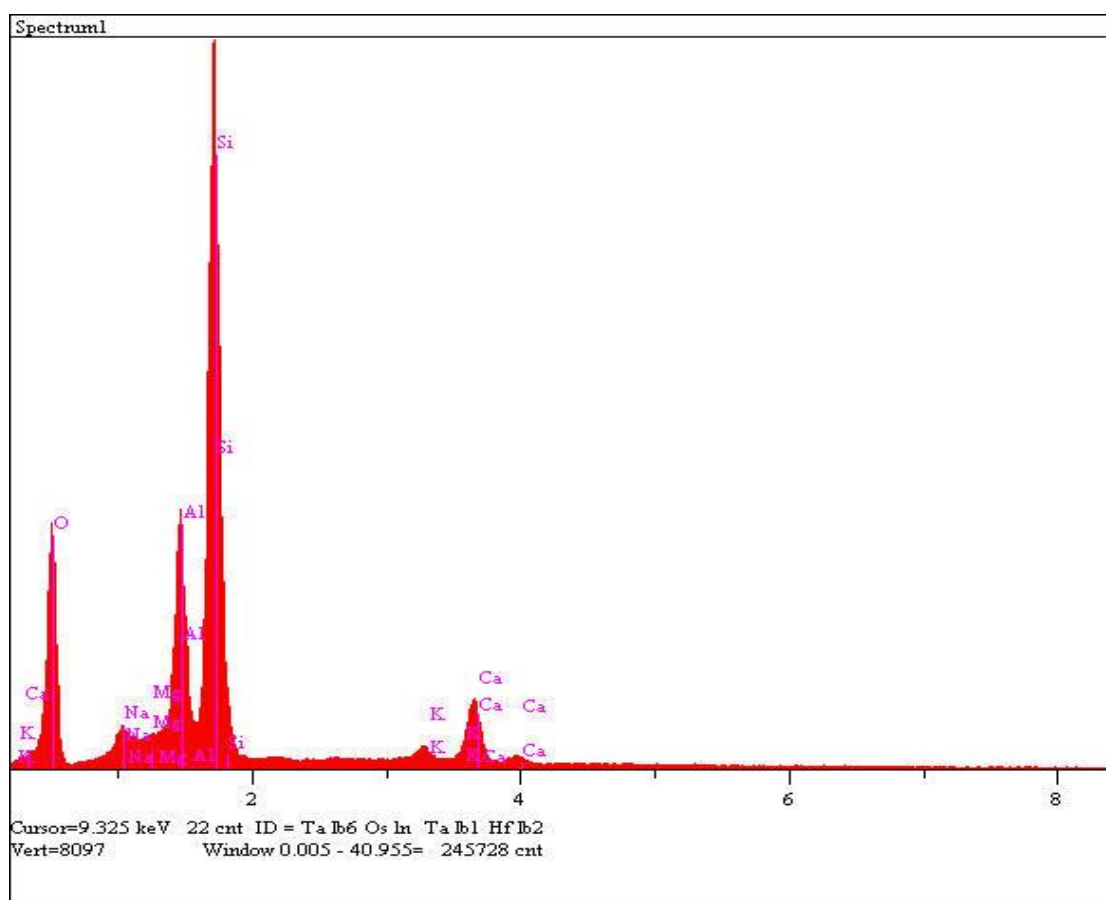
Tabela 45 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 5

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	2.391	O	344.59	4.793	0.000
Si	65.829	Na	68.91	2.143	3.646
Ca	7.147	Mg	54.24	1.902	2.391
Na	3.646	Al	443.66	5.438	19.194
Al	19.194	Si	1225.76	9.039	65.829
O	0.000	K	26.39	1.260	1.793
K	1.793	Ca	104.66	2.641	7.147
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

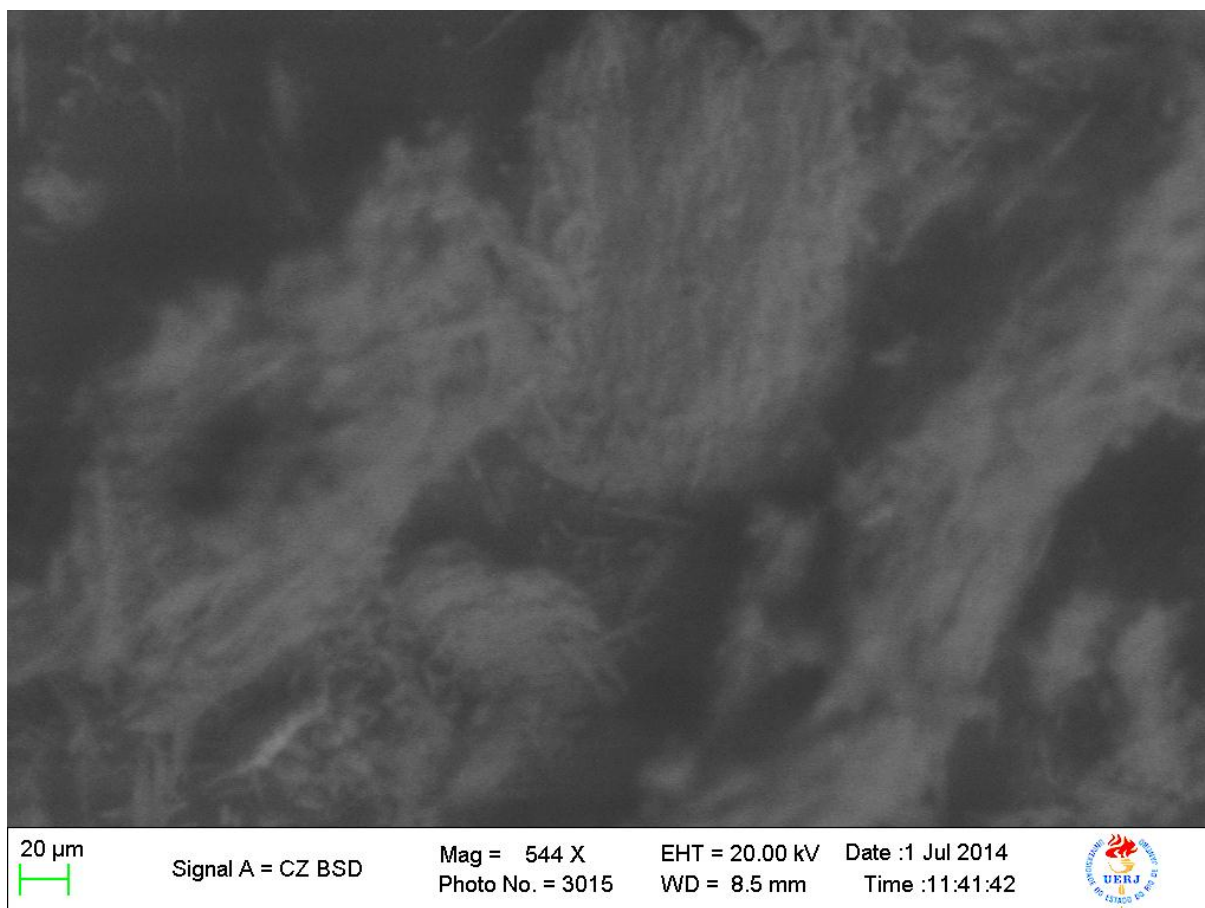
Figura 90 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 5



Fonte: O autor, 2014

4.7.7 Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 6

Figura 91 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 544 X Zona 6



Fonte: O autor, 2014

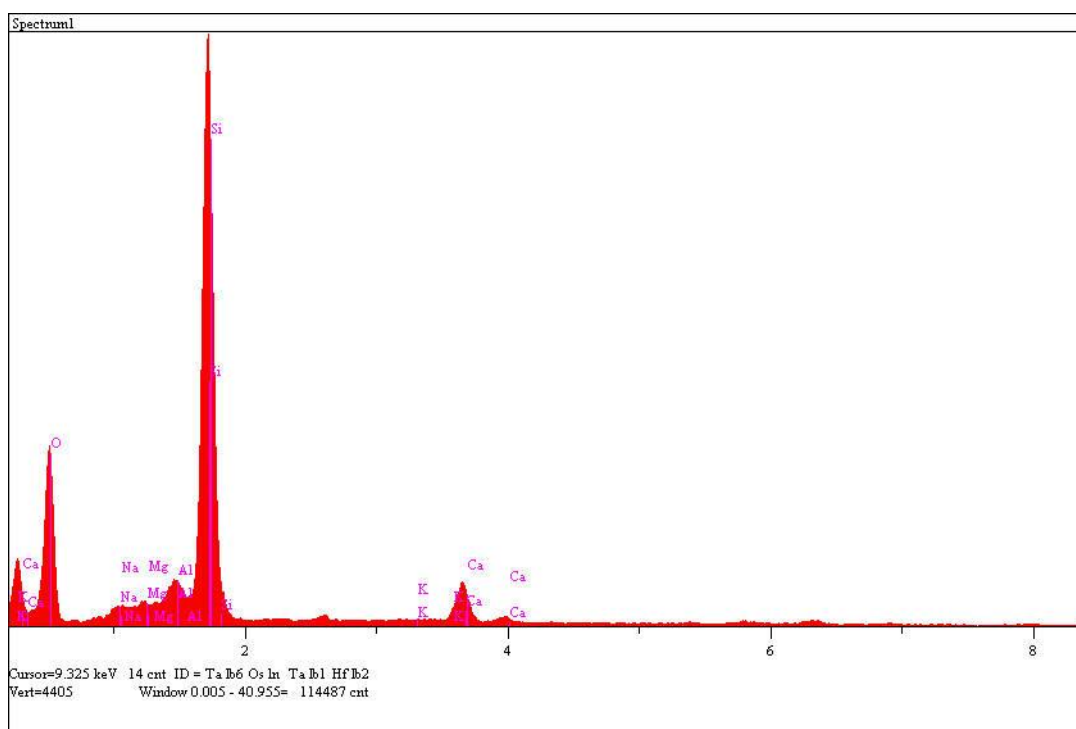
Tabela 46 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 6

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	1.118	O	164.98	3.316	0.000
Si	82.755	Na	10.71	0.845	1.808
Ca	9.090	Mg	8.35	0.746	1.118
Na	1.808	Al	39.08	1.614	4.830
Al	4.830	Si	597.43	6.311	82.755
O	0.000	K	1.87	0.353	0.399
K	0.399	Ca	42.55	1.694	9.090
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

Figura 92 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 6

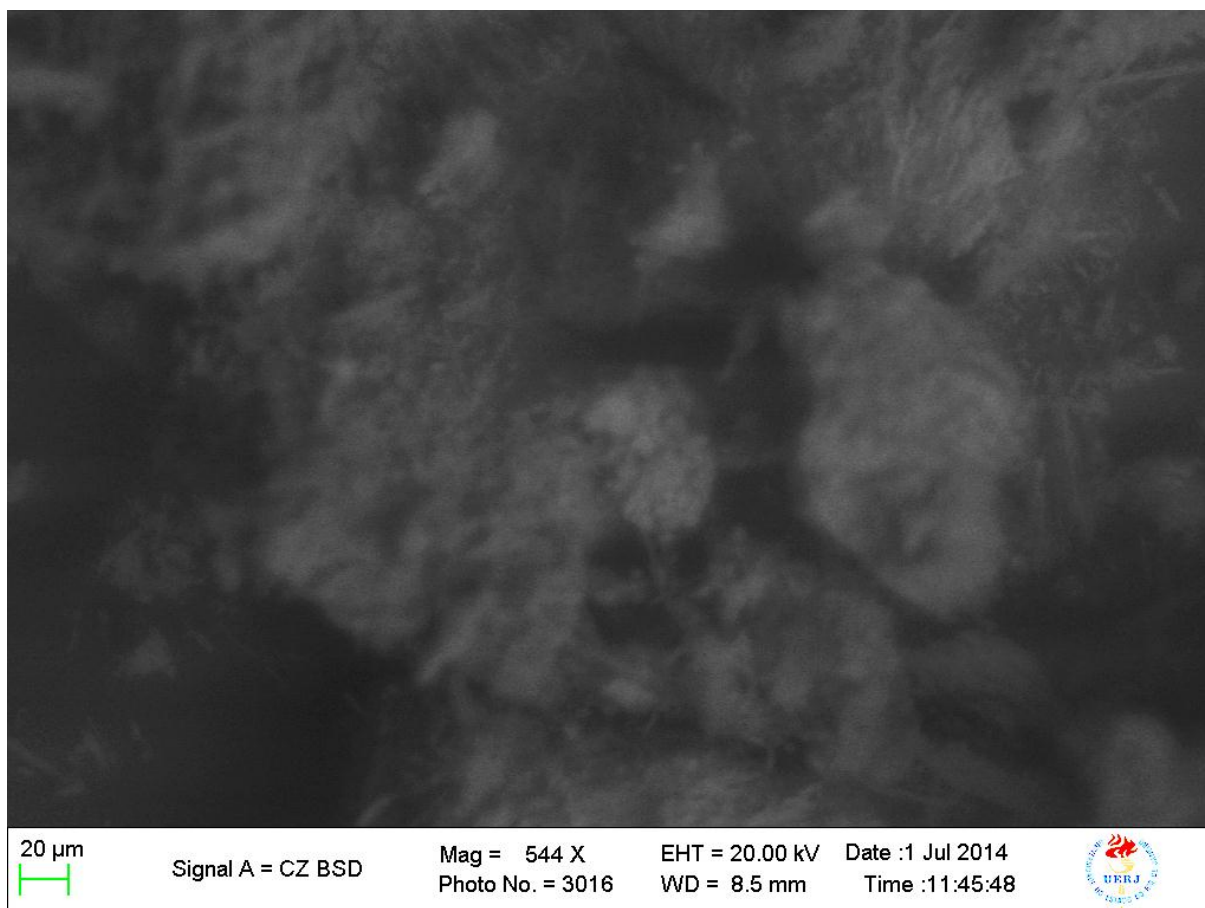


Fonte: O autor, 2014



4.7.8 Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 7

Figura 93 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 544 X Zona 7



Fonte: O autor, 2014

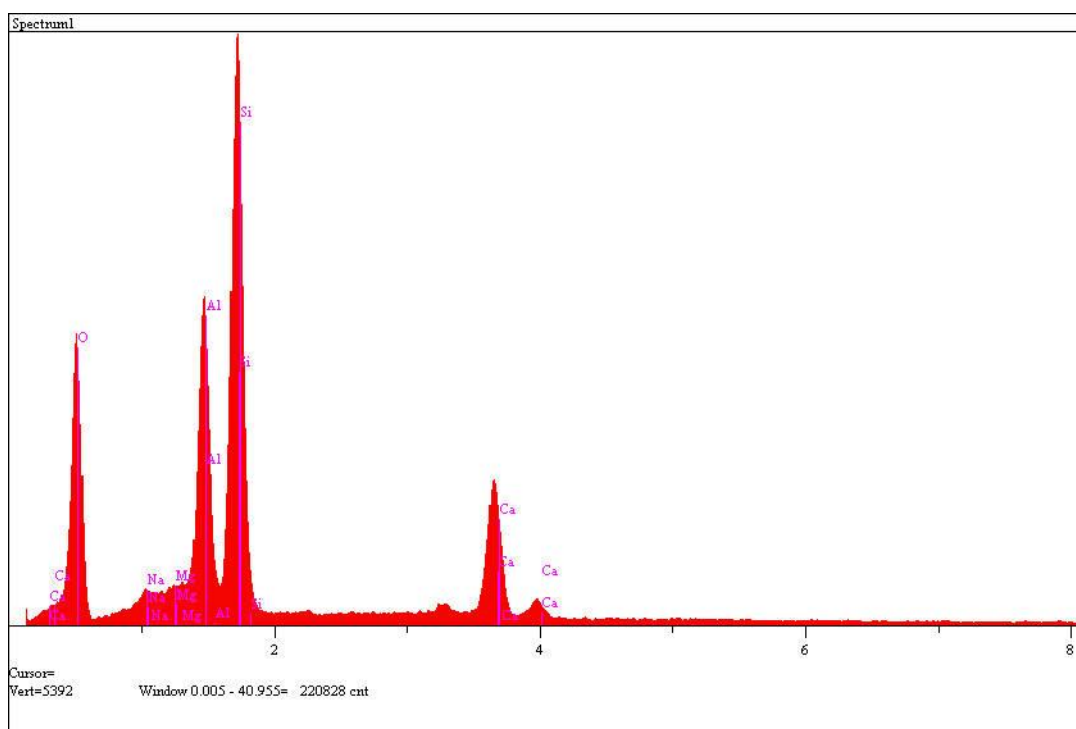
Tabela 47 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 7

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	1.592	O	85.24	2.384	0.000
Si	86.714	Na	4.10	0.523	1.242
Ca	8.305	Mg	6.72	0.669	1.592
Na	1.242	Al	9.87	0.811	2.146
Al	2.146	Si	357.39	4.881	86.714
O	0.000	Ca	21.35	1.193	8.305
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

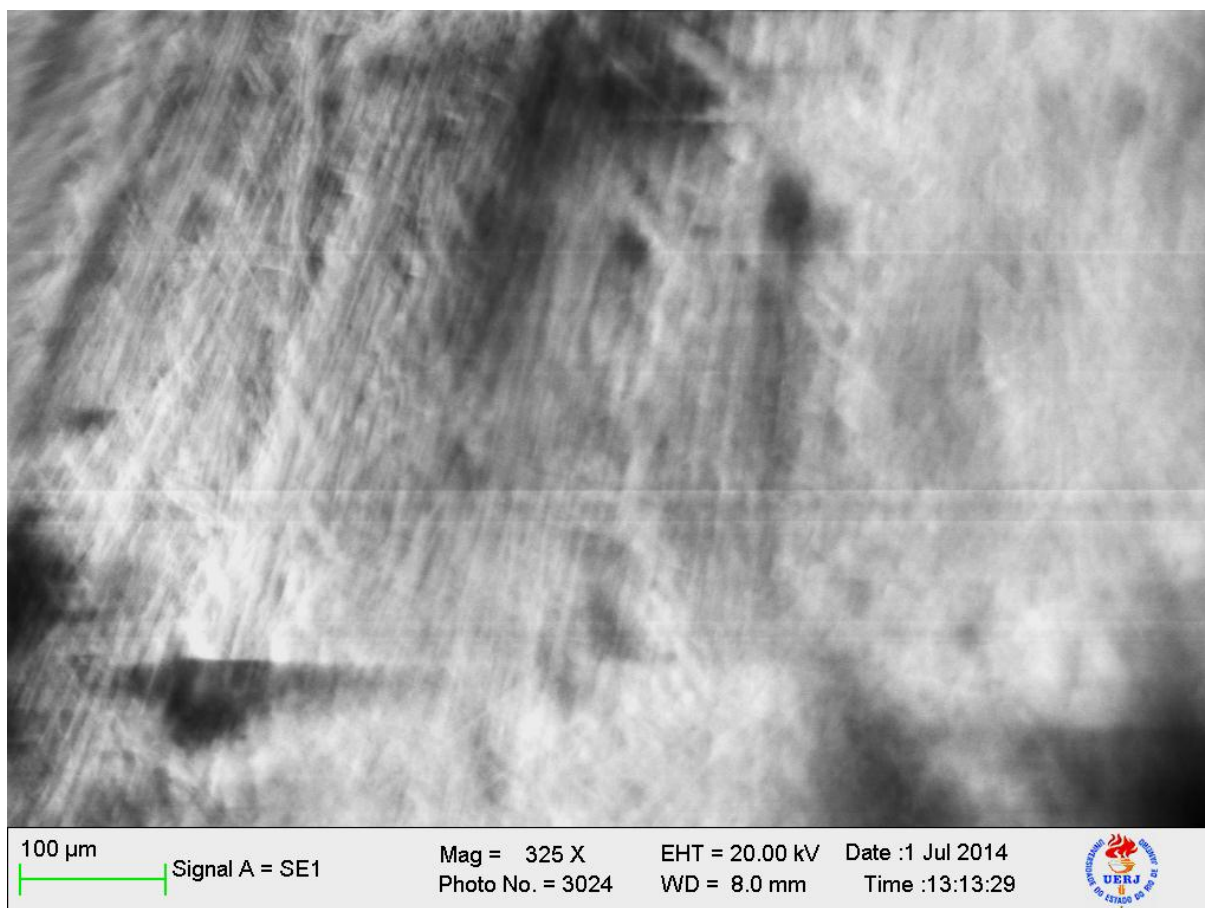
Figura 94 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS



Fonte: O autor, 2014

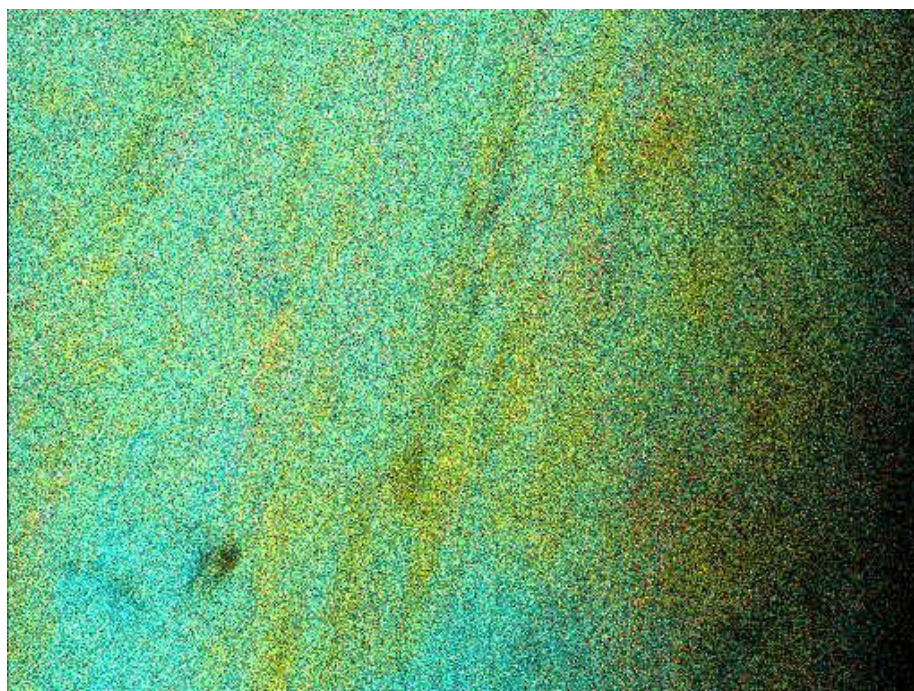
4.7.9 Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 8

Figura 95 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 325 X Zona 8



Fonte: O autor, 2014

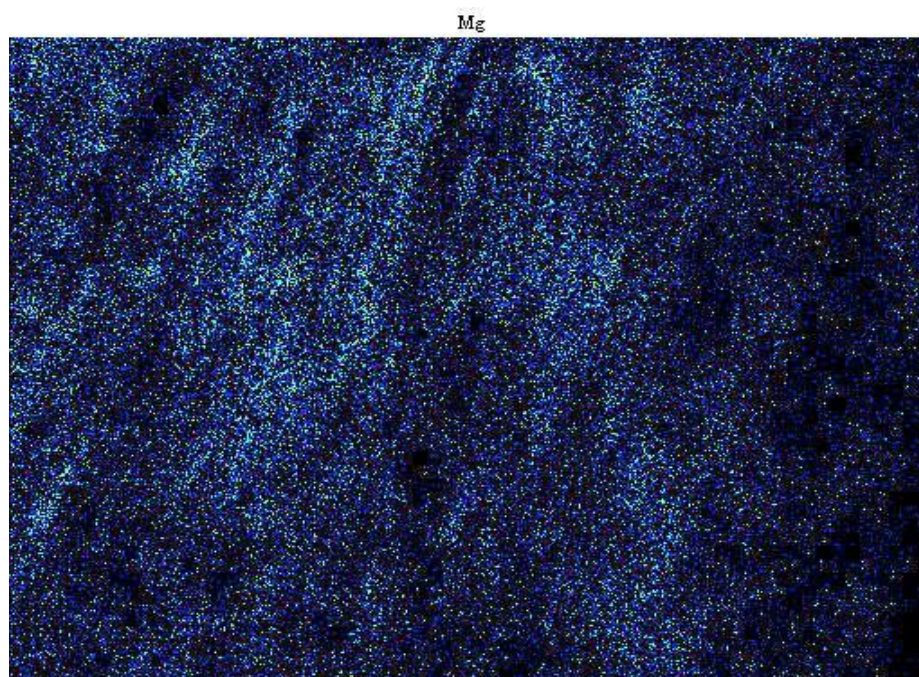
Figura 96 – Amostra B Estevensita / Pectolita 325 X



Legenda: A cor azul indica a presença de Ca, a cor amarela indica a presença de Si e a cor verde indica a presença de Mg.

Fonte: O autor, 2014

Figura 97 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 325 X



Legenda: Os pontos brilhantes indicam a presença de Mg.

Fonte: O autor, 2014

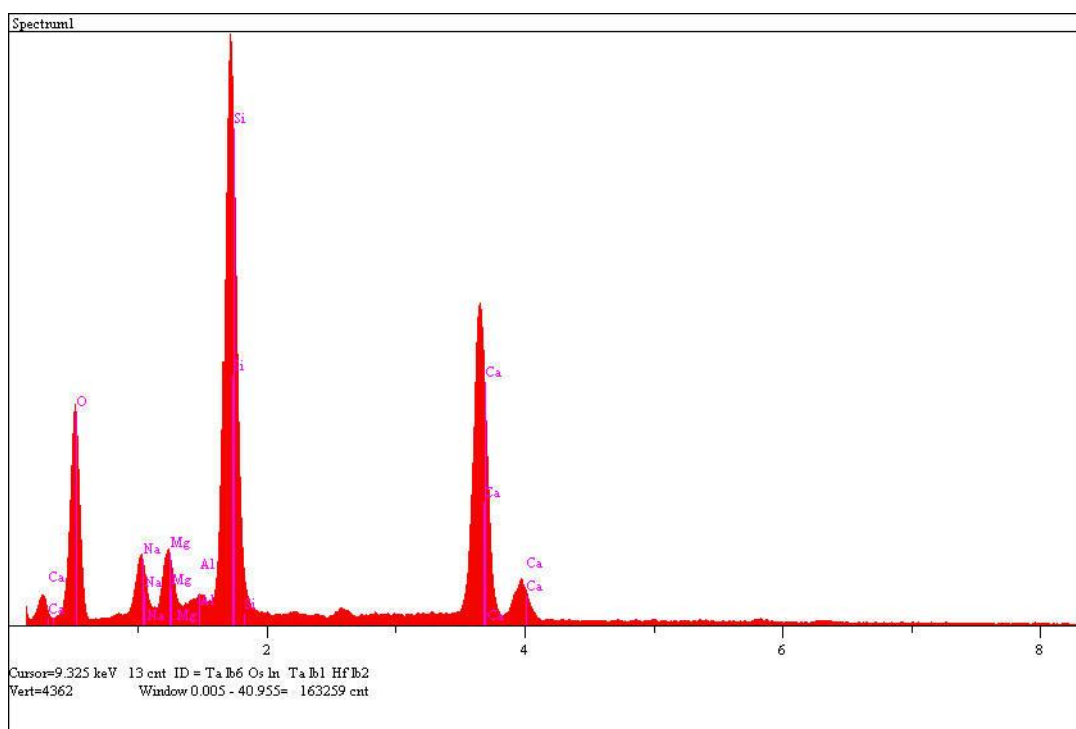
Tabela 48 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 8

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	6.989	O	378.54	5.023	0.000
Si	50.759	Na	87.63	2.417	6.146
Ca	34.819	Mg	122.12	2.853	6.989
Al	1.287	Al	23.29	1.246	1.287
O	0.000	Si	974.24	8.059	50.759
Na	6.146	Ca	511.90	5.842	34.819
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

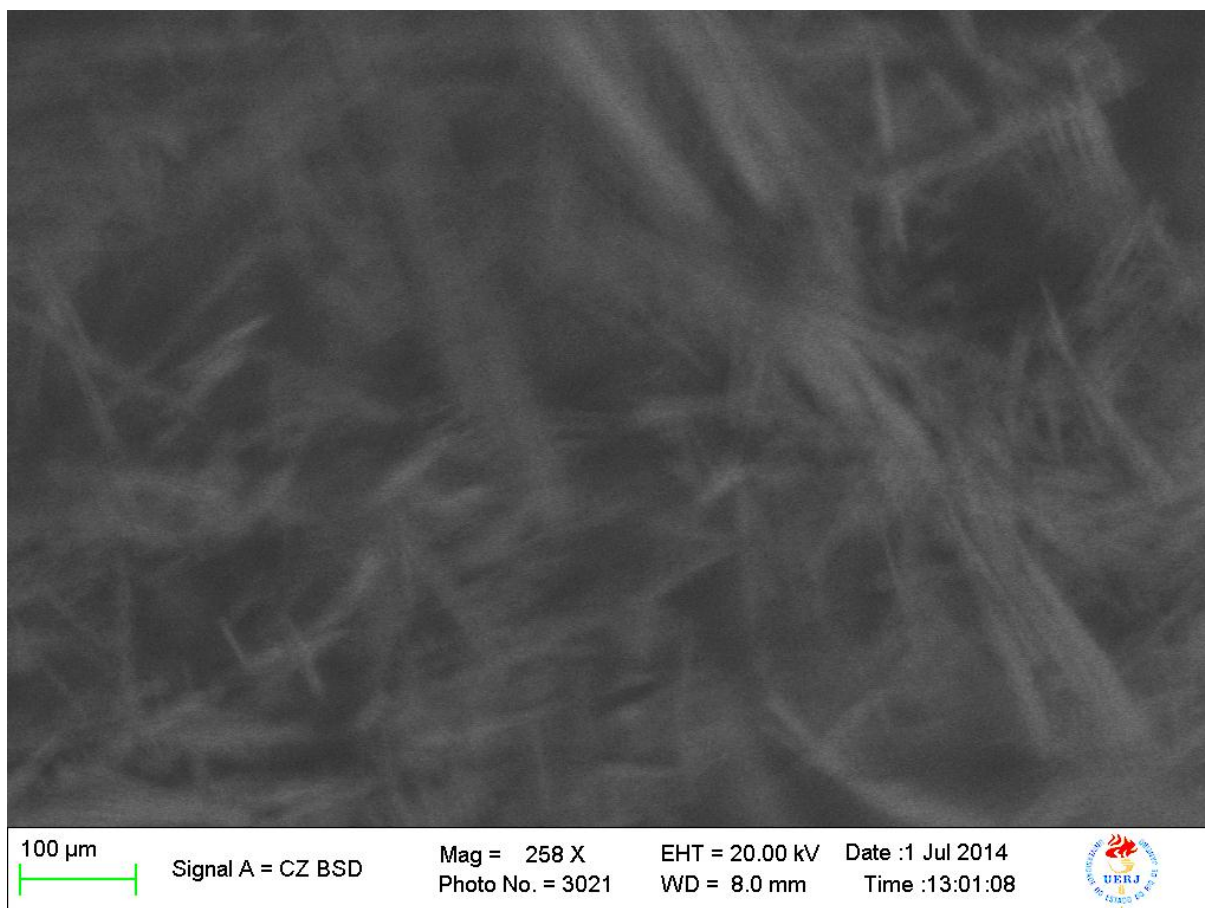
Figura 98 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 8



Fonte: O autor, 2014

#### 4.7.10- Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 9

Figura 99 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 258 X Zona 9



Fonte: O autor, 2014

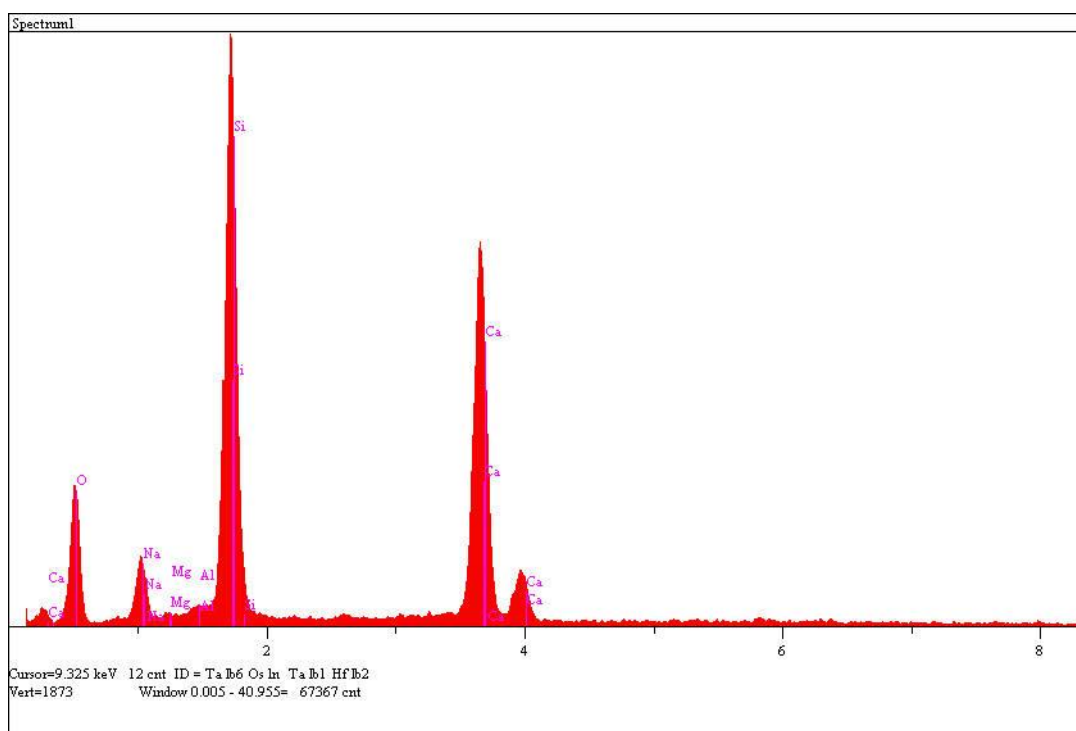
Tabela 49 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 9

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	0.192	O	60.94	2.016	0.000
Si	50.244	Na	27.21	1.347	7.587
Ca	41.077	Mg	0.84	0.237	0.192
Al	0.901	Al	4.57	0.552	0.901
O	0.000	Si	265.67	4.208	50.244
Na	7.587	Ca	160.89	3.275	41.077
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

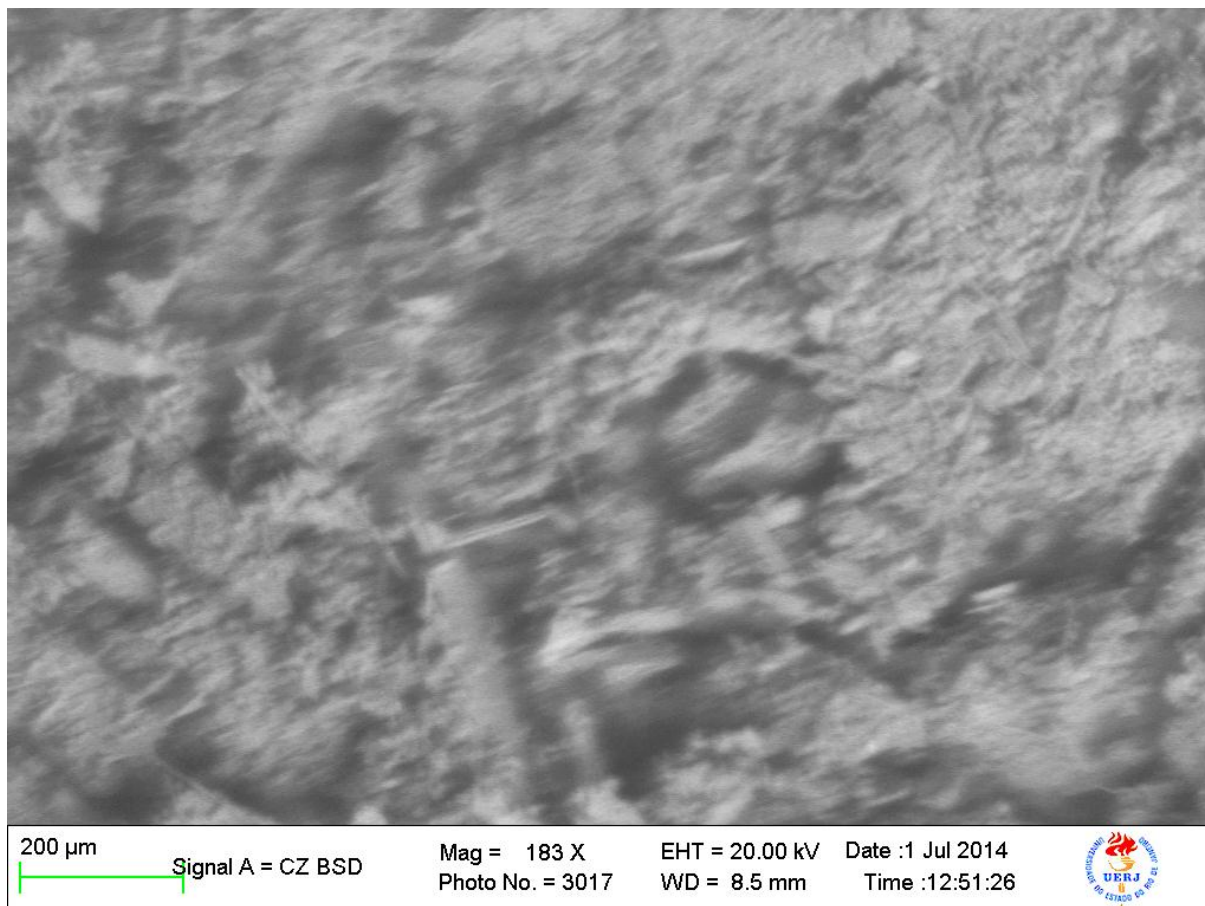
Figura 100 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 9



Fonte: O autor, 2014

4.7.11 Amostra B Estevensita / Pectolita Zona 10

Figura 101 – Amostra B Estevensita / Pectolita Imagen 183 X Zona 10



Fonte: O autor, 2014



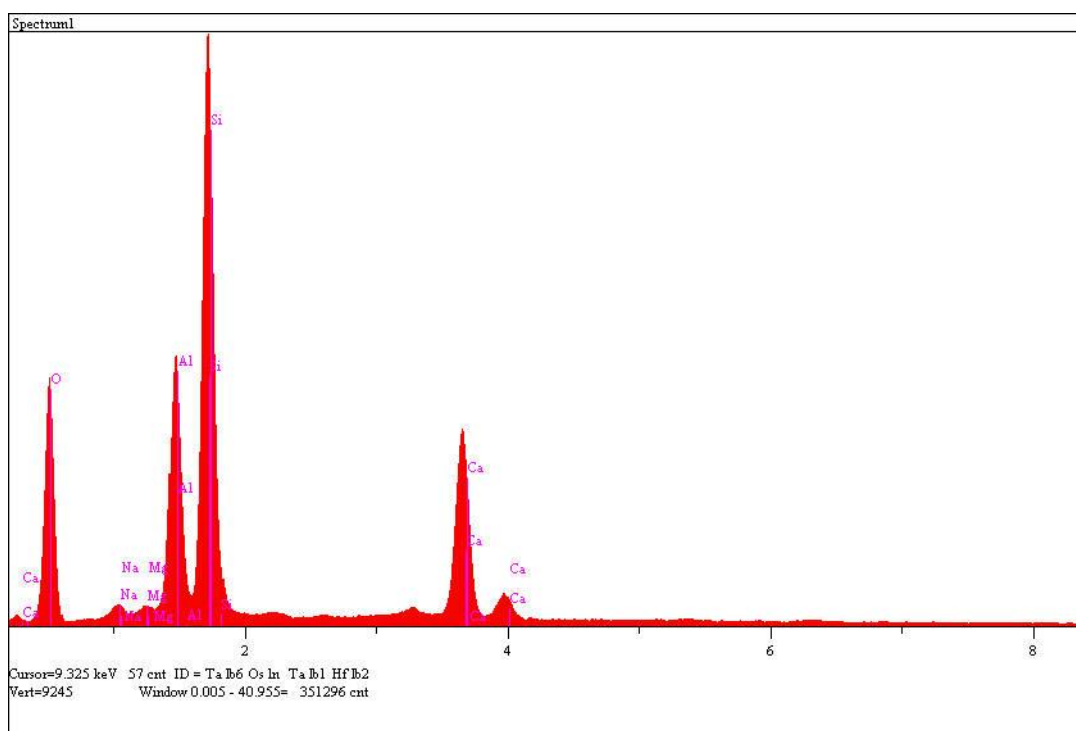
Tabela 50 – Amostra B Estevensita-Pectolita MEV-EDS Zona 10

Oxidos	Concentração	Elementos	Intensidade (c/s)	Erro (2-sig)	Concentração (wt.%)
Mg	0.574	O	501.35	5.781	0.000
Si	56.153	Na	27.28	1.349	1.253
Ca	21.799	Mg	16.23	1.040	0.574
Na	1.253	Al	600.83	6.329	20.221
Al	20.221	Si	1345.27	9.472	56.153
O	0.000	Ca	426.43	5.332	21.799
<b>Total</b>	<b>100.000</b>			<b>Total</b>	<b>100</b>

/KV=20/Takeoff Angle=45/Elapsed Livetime=60/

Fonte: O autor, 2014

Figura 102 – Amostra B Estevensita / Pectolita EDS Zona 10



Fonte: O autor, 2014

#### 4.7.12 Conclusão com respeito à análise da amostra B de Estevensita

A amostra B recebida não é pura em nenhuma das dez zonas observadas. Além das zonas apresentadas, outras vinte com ainda menor índice de magnésio foram observadas com resposta de Pectolita, i.e, praticamente ausência de magnésio. A maior quantidade de Estevensita aparece nas Figuras 95, 96 e 97 com porcentagem de magnésio da ordem de 7%. Esta área da amostra B, zona 8, foi a que apresentou maior índice de magnésio apesar da mesma ter um maior tamanho não sendo possível encontrar valores tão altos como na amostra A de Estevensita, onde encontramos valores de até 23%. Desta maneira, a amostra A de Estevensita foi a utilizada como representativa de maior pureza para este estudo, com máximo de 23% de magnésio.

Devido ao baixo conteúdo de magnésio visto em todas as áreas analisadas da amostra B podemos concluir que a mesma é predominantemente Pectolita com traços de Estevensita.

#### 4.8 **Conclusão geral dos resultados das amostras de Estevensita**

Como conclusão geral com respeito às duas amostras obtidas nos Estados Unidos é de que não são puras e na verdade são uma mistura de Pectolita e Estevensita. A amostra A analisada foi a que apresentou melhor pureza tendo sido usada neste estudo.

Com a amostra A foi possível analisar Estevensitas texturais e amorfas. Coloração e textura não indicam tratar-se de Pectolita ou de Estevensita. Em trabalhos futuros recomenda-se utilizar dados obtidos com análises de Estevensita do próprio pré-sal quando estiverem disponíveis utilizando a mesma metodologia que se indicará no Capítulo 5.

A amostra B de Estevensita apresenta conteúdo muito baixo de magnésio indicando tratar-se de Pectolita com traços de Estevensita.

## 5 ANÁLISE DO MÉTODO COM DADOS REAIS DE POÇO

### 5.1 Introdução

Neste Capítulo o método será analisado e explicado em detalhes. Devido ao fato de os dados serem confidenciais não serão mostrados dados de poço propriamente ditos. Todavia, será possível verificar a metodologia através dos resultados comparados obtidos nos três poços de controle com respeito aos dados de testemunho e também entender a resposta padrão de registros na presença de Estevensita. Foram analisados três poços com dados de testemunho para controle da metodologia.

No trabalho foi utilizado o programa Techlog (Schlumberger trademark), no entanto como dito anteriormente o método funciona em qualquer programa probabilístico. Na indústria petroleira há uma gama destes programas petrofísicos onde o princípio de funcionamento é utilizar como entrada os dados obtidos com registros em poços, por exemplo: raios gama (GR), densidade (RHOB), resistividade (AT90), porosidade neutrônica (NPHI), porosidade do ressonância magnética (TCMR) e etc para resolver as incógnitas que são os volumes dos minerais e fluidos presentes na formação, como por exemplo: volume de argila, volume de carbonatos, volume de Estevensita, volume de água, volume de óleo, volume de gás e etc. A vantagem dos programas probabilísticos é usar todas as medições disponíveis em registros elétricos para a resposta final volumétrica honrar de maneira fidedigna a realidade das formações estudadas.

A metodologia dos programas probabilísticos resolve simultaneamente todas as equações, um conjunto linear de equações relacionadas com as respostas obtidas das medidas tomadas com registros elétricos, incluindo a medição de espectroscopia induzida, e soluciona o problema para as incógnitas que são os volumes que queremos conhecer (volumes de fluidos e minerais). Para ter resultados significativos com este método, é preciso conhecer os valores de leitura do mineral puro com respeito à cada leitura obtida com determinado registro elétrico. O mesmo ocorrendo com os fluidos incluídos no modelo estocástico. No caso da Estevensita, precisamos conhecer a resposta de cada medição elétrica com respeito a este mineral, daí a necessidade do estudo laboratorial com o mesmo na forma mais pura deste, para definir estes pontos do material puro a serem utilizados nos programas probabilísticos. Todos os minerais e fluidos comuns encontrados em rochas reservatório têm seus pontos

conhecidos, no entanto, isso não ocorre com a Estevensita por tratar-se de um mineral desconhecido para a indústria petroleira até o advento do pré-sal, onde se observa este tanto na seção rifte como na seção sag. Com os dados obtidos na parte laboratorial desta tese e do estudo na literatura com respeito ao mineral Estevensita, se elaborou a tabela 51 que deve ser utilizada para a metodologia proposta e diz respeito ao mineral puro Estevensita (dados denominados *end points*) para servir de entrada ao programa petrofísico estocástico ou probabilístico. Todos os outros parâmetros não mencionados na tabela da Figura 103 devem ter seus valores em zero nos programas estocásticos utilizados, por exemplo, fração seca de enxofre e etc, uma vez que não existe enxofre na fórmula da Estevensita (material puro).

Tabela 51 – Mineral puro Estevensita (“end points”) Dados de Entrada

Mineral Estevensita ("end points")			
Densidade	RHOB	2.49	g/cc
Porosidade nêutronica	NPHI	0.8	PU
Fator Volumetrico	U	5.33	b/cc
Porosidade Ressonancia	TCMR	0	PU
Volume nao livre Ressonancia	BFV	0	PU
Fuido livre Ressonancia	FFV	0	PU
Fracao seca Aluminio	DWAL	0	lbf/lbf
Fracao seca Magnésio	DWMG	0.144	lbf/lbf
Fracao seca Ferro	DWFE	0.0237	lbf/lbf
Fracao seca Silicio	DWSI	0.2384	lbf/lbf
Fracao seca Calcio	DWCA	0	lbf/lbf
Fracao seca Sodio	DWNA	0	lbf/lbf
Capacidade de troca Cationica	CEC	60	mEq/100

Fonte: O autor, 2014

## 5.2 Discussão Crítica da tabela 51

A metodologia proposta com a tabela 51 pode ser modificada ligeiramente com os dados da Estevensita específica encontrada na região em estudo, uma vez que a Estevensita utilizada neste estudo pode variar ligeiramente com respeito à Estevensita do pré-sal, por exemplo. No entanto, este estudo verificou que nos três poços de controle utilizando-se os valores da tabela acima foram bons os resultados de comparação entre dados de poço e

testemunho obtidos no pré-sal. Abaixo se faz uma análise crítica com respeito aos pontos propostos na tabela 51 acima.

### 5.2.1 Densidade

Pode variar entre 2.39 a 2.59 g/cc sem influenciar os resultados drasticamente. Muito embora a literatura indique variações de 2.15 a 2.75 g/cc não se recomenda variar este parâmetro além de 0.1 g/cc do valor de referência 2.49. A literatura<sup>10</sup> indica para a Estevensita encontrada na Formação Lagoa Feia uma densidade de 2.34 g/cc, no entanto este valor está abaixo do mínimo proposto de 2.39.

### 5.2.2 Porosidade neutrônica

Pode variar entre 0.75 a 0.85 PU sem influenciar os resultados drasticamente. O valor de 0.8 PU funcionou de maneira perfeita nos poços de controle do pré-sal. Como mencionado anteriormente neste trabalho não houve uma amostra de Estevensita com pureza suficiente para fazer uma determinação de porosidade confiável para utilizar como um valor da Estevensita pura. Para resolver este impasse se optou por um processo de análise da literatura onde é mencionado que a porosidade da Estevensita é dez vezes maior do que a da Montmorilonita segundo Hayashi et al (1999). A porosidade neutrônica da Montmorilonita é de 0.4 PU em programas probabilísticos, portanto não se poderia usar um valor dez vezes maior pois implicaria em um valor de 4 o que não é aceitável nos programas petrofísicos. No entanto, sabemos tratar-se de um valor alto pois a curva do neutrão frente a Estevensita se aproxima de 0.4 com 35% de Estevensita visto em testemunhos na respectiva profundidade de registro, o que indica que um valor de Estevensita pura entre 0.8 e 0.85 não está fora de propósito. Além da mencionada análise, usaram-se os próprios dados dos três poços para fazer uma averiguação da sensibilidade para encontrar o melhor valor de porosidade da Estevensita pura sendo o valor de 0.8 PU o mais apropriado.

### 5.2.3 Fator volumétrico

Pode variar entre 5.15 a 5.45 b/cc sem influenciar os resultados drasticamente. O valor de 5.33 funcionou de maneira perfeita nos poços de controle do pré-sal.

### 5.2.4 Porosidade do ressonância magnética

Não se deve variar este parâmetro. Zero é o valor ideal.

### 5.2.5 Volume não livre do ressonância magnética

Não se deve variar este parâmetro. Zero é o valor ideal.

### 5.2.6 Fluido livre do ressonância magnética

Não se deve variar este parâmetro. Zero é o valor ideal.

### 5.2.7 Fração seca do alumínio

A literatura é divergente quanto a presença ou não de alumínio na Estevensita. No texto utilizamos a fórmula de Estevensita sem a presença de alumínio, no entanto há autores que consideram a presença de alumínio neste mineral. Zero foi utilizado com resultados bons, no entanto, para honrar estudos que mencionam alumínio na Estevensita e devido ao fato da metodologia ter sido testada em apenas três poços de controle poder-se-ia variar este

parâmetro até um máximo de 0.04, i.é, 4%, segundo o trabalho de Rhouta et al (2008)<sup>15</sup>. No entanto zero foi utilizado com sucesso nos poços de controle sem afetar a resposta e com boa comparação entre poço e testemunho.

#### 5.2.8 Fração seca do magnésio

O valor de 0.144 é um bom valor e não se deve variar.

#### 5.2.9 Fração seca do ferro

Pode-se variar este valor desde 0.02 até 0.026 lbf/lbf sem prejuízo à interpretação. Nos poços de controle foi utilizado 0.0237 com bons resultados.

#### 5.2.10 Fração seca do silício

Pode-se variar este valor desde 0.2 até 0.27 lbf/lbf sem variar drasticamente a interpretação. Nos poços de controle foi utilizado 0.2384 com bons resultados.

#### 5.2.11 Fração seca do cálcio

Muito embora a fórmula da Estevensita tenha cálcio, se observou que nos poços de controle do pré-sal utilizar este valor diferente a zero causa ruído aos dados devido ao ambiente de medição que tem cálcio em abundância nos carbonatos (Calcita e Dolomita).

---

<sup>15</sup> RHOUTA, B., KADDAMI, H., ELBARQY, J., AMJOURD, M., DAOUDI, L., MAURY, F., SENOCQ, F., MAAZOUUZ, A., and GERARD, J. F., Elucidating the crystal-chemistry of Jbel Rhassoul stevensite (Morocco) by advanced analytical techniques. *Clay Minerals*, v. 43, p. 393 403, 2008.

Recomendamos assim utilizar o valor de zero pelos resultados obtidos nos três poços. No entanto, abre-se o parâmetro para futuras investigações com uma gama maior de poços. Teoricamente poder-se-ia utilizar este parâmetro desde zero (experiência utilizada nesta tese até o valor teórico de 0.0128 lbf/lbf).

#### 5.2.12 Fração seca do sódio

Muito embora a fórmula da Estevensita tenha sódio, se observou que nos poços de controle do pré-sal utilizar este valor diferente a zero causa ruído aos dados proveniente do ambiente de medição que tem sódio advindo majoritariamente da Halita (NaCl) como observado nesta tese nas rochas da Lagoa Feia. Recomendamos utilizar o valor de zero pelos resultados obtidos nos três poços, no entanto, abre-se o precedente para futuras investigações com uma gama maior de poços. Teoricamente poder-se-ia utilizar este parâmetro desde zero (por experiência desta tese até o valor teórico de 0.0161 lbf/lbf).

#### 5.2.13 Capacidade de troca catiônica

O valor de 60 mEq/100 foi utilizado com sucesso nos três poços de controle. Este dado foi obtido da literatura disponível<sup>30</sup> e usando este valor não afetou de forma negativa a comparação entre poço e testemunho. Existem outros estudos na literatura<sup>16</sup> que indicam valores de CEC um pouco mais baixos da ordem de 39 mEq/100 indicado na bibliografia. Utilizamos o valor de 60 mEq/100 com bons resultados, porém deve ser considerado um estudo mais detalhado a fim de poder alcançar uma variação confiável para este parâmetro especialmente quando se conseguir valores medidos com a Estevensita proveniente do pré-sal.

---

<sup>16</sup> Como o trabalho de Abraão e Warne (1990), citado anteriormente no presente trabalho.



#### 5.2.14 Todos os demais parâmetros não mencionados

Todos os demais parâmetros adicionais da tabela da Figura 103 devem ter seu valor fixado em zero ou obtidos a partir de análises laboratoriais com outras medições não realizadas nesta tese; como por exemplo, a velocidade da onda compressional, a de cisalhamento e etc.

### 5.3 Respostas de registros com respeito a Estevensita utilizando Techlog

A Estevensita poderá ser detectada em registros com porcentagens na formação superiores a 10% em volume. Porcentagens inferiores a este valor não foram detectados nos três poços de controle utilizados.

Falsos positivos foram detectados quando se utilizou porosidade neutrônica inferior a 0.6 ou não se utilizou a curva NPHI. Isto indica que a porosidade neutrônica é uma medição importante para a detecção de Estevensita sem ambiguidades. Outra medição importante para evitar falsos positivos é a medição de ressonância magnética, deve-se usar na interpretação da Estevensita algumas das seguintes medições já comentadas tais como TCMR ou BFV ou FFV. A distribuição T2 do ressonância magnética em zonas com Estevensita vai estar localizada na escala de tempo entre 0.2 e 3 msec. Um problema com esta interpretação visual é que todos os folhelhos se posicionam nesta mesma escala de tempo assim como óleos pesados.

Como já mencionado neste trabalho, a informação dos pesos secos provenientes da espectroscopia induzida é fundamental para fechar o modelo petrofísico, devido à importante informação proveniente da medição do magnésio (DWMG). No entanto, esta medição será alta em zonas com alto conteúdo de Estevesita, assim como, e em zonas com alto conteúdo de Dolomita ou mesmo de uma mistura de estevesita e Dolomita.

#### 5.4 Resultados obtidos nos poços de controle

A visão holística para solucionar o problema utiliza todas as medições disponíveis a fim de identificar sem ambiguidades Estevensita com volumes superiores a 10% em volume nas rochas do pré-sal. As análises nos três poços foram feitas inicialmente com dados básicos de raios gama, densidade, neutrão, resistividade, fator fotoelétrico com resultados regulares na identificação de Estevensita superior a 10% em volume. Considera-se dados regulares pois apresentam variações de no mínimo 10% do volume calculado de Estevensita com respeito aos valores obtidos em testemunhos. Por exemplo, o valor de testemunho indica 35% enquanto o programa obteve 25%. No melhor dos casos, o que é um erro muito alto. Neste universo pequeno avaliado de poços pode-se concluir que utilizando apenas dados básicos de registros vamos identificar a presença de Estevensita mas haverá erros em sua quantificação.

Após fazer a análise com os registros básicos mencionados acima adicionou-se a informação do ressonância magnética que pode ser qualquer uma das curvas TCMR, BFV ou FFV ou uma combinação destas. Quando se adicionou a informação do ressonância magnética, a resposta melhorou substancialmente em termos de eliminação de falsos positivos e melhorou na quantificação do volume de Estevensita quando comparado com testemunho. Ao se adicionar as curvas dos pesos secos provenientes da espectroscopia induzida DWMG e DWFE obteve-se um melhor ajuste do ponto de vista de uma melhor quantificação do volume da Estevensita. Utilizando todos os dados proporciona-se uma melhor resposta quando comparado com os dados de testemunho. A melhor resposta que se obteve com a metodologia no poço número 1 foi a de um erro de 4% em 35% no volume de Estevensita quando comparado com testemunho. Ao considerarmos a avaliação do testemunho com margem zero de erro, obtivemos com a metodologia nos três poços estudados em média 11,4% de nível de erro na avaliação petrofísica no volume de estevensita. Mesmo utilizando a gama completa de dados, conseguimos intervalos de falsos positivos com volumes entre 4 a 6% de Estevensita. Como se considera que a metodologia funciona acima de 10% em volume, qualquer valor menor do que 10% deve ser considerado falso positivo e não ser considerado.

Se concluiu que as curvas NPHI e TCMR são importantes para eliminar falsos positivos e as curvas de peso seco são importantes para uma melhor quantificação dos volumes de Estevensita conjuntamente com todos os outros dados mencionados no parágrafo inicial. A figura 103 mostra os vários parâmetros que podem ser adicionados para cada

medição, no entanto a tabela 51 proposta indica os parâmetros necessários para utilização da metodologia com sucesso.

Figura 103 – Parâmetros Techlog (*end points*)

Aluminum Weight Fraction	Porosity
Aluminum Wet Weight Fraction	Potassium Concentration
Bound Water Volume	Potassium Weight Fraction
Bulk Density	RES
Bulk Modulus (Static)	Shear Slowness
Calcium Weight Fraction	Silicon Weight Fraction
Calcium Wet Weight Fraction	Silicon Wet Weight Fraction
Carbon Inorganic Weight Fraction	Sodium Weight Fraction
Carbon Organic Weight Fraction	Specific Area
Carbon Weight Fraction	Sulfur Weight Fraction
Cation Exchange Capacity	Sulfur Wet Weight Fraction
Compressional Slowness	Thorium Concentration
Compressional Velocity	Titanium Weight Fraction
Conductivity	Titanium Wet Weight Fraction
Electromagnetic Propagation Time	Uranium Concentration
Epithermal Neutron Porosity	Volumetric Photoelectric Effect
Formation Sigma	WCLP
Gadolinium Weight Fraction	
Gadolinium Wet Weight Fraction	
Gamma Ray	
Iron Weight Fraction	
Iron Wet Weight Fraction	
Magnesium Weight Fraction	
Magnesium Wet Weight Fraction	
Manganese Weight Fraction	
NMR Free Fluids	
NMR Porosity	
Neutron Porosity	
Permittivity	
Photoelectric Factor	
Poisson Ratio (Dynamic)	

Legenda: A figura é referente ao *screenshot* do software Techlog exibindo os parâmetros que podem definir o mineral Estevensita.

Fonte: O autor, 2014.

## 6 TEORIA DE FORMAÇÃO DE ESTEVENSITA NO PRÉ-SAL

O pré-sal brasileiro é a maior descoberta petrolífera mundial do século XXI. O petróleo do pré-sal está localizado em reservatórios situados abaixo da espessa camada de sal, da ordem de 700 a 1500 metros ou mais de espessura salina majoritariamente Halita (cloreto de sódio) e na interface com o reservatório existe a presença de Anidrita (sulfato de cálcio). No entanto, se encontram intercalações de outros sais como Tacdrita, Carnalita e Silvita. O pré-sal já descoberto ocorre na região costa-afora do Espírito Santo até Santa Catarina, em águas profundas e ultraprofundas, localizados sob 3000 a 4000 metros de rochas abaixo do fundo marinho, como pode ser visto na figura 104.

Figura 104 – Pré-Sal descoberto até 2014

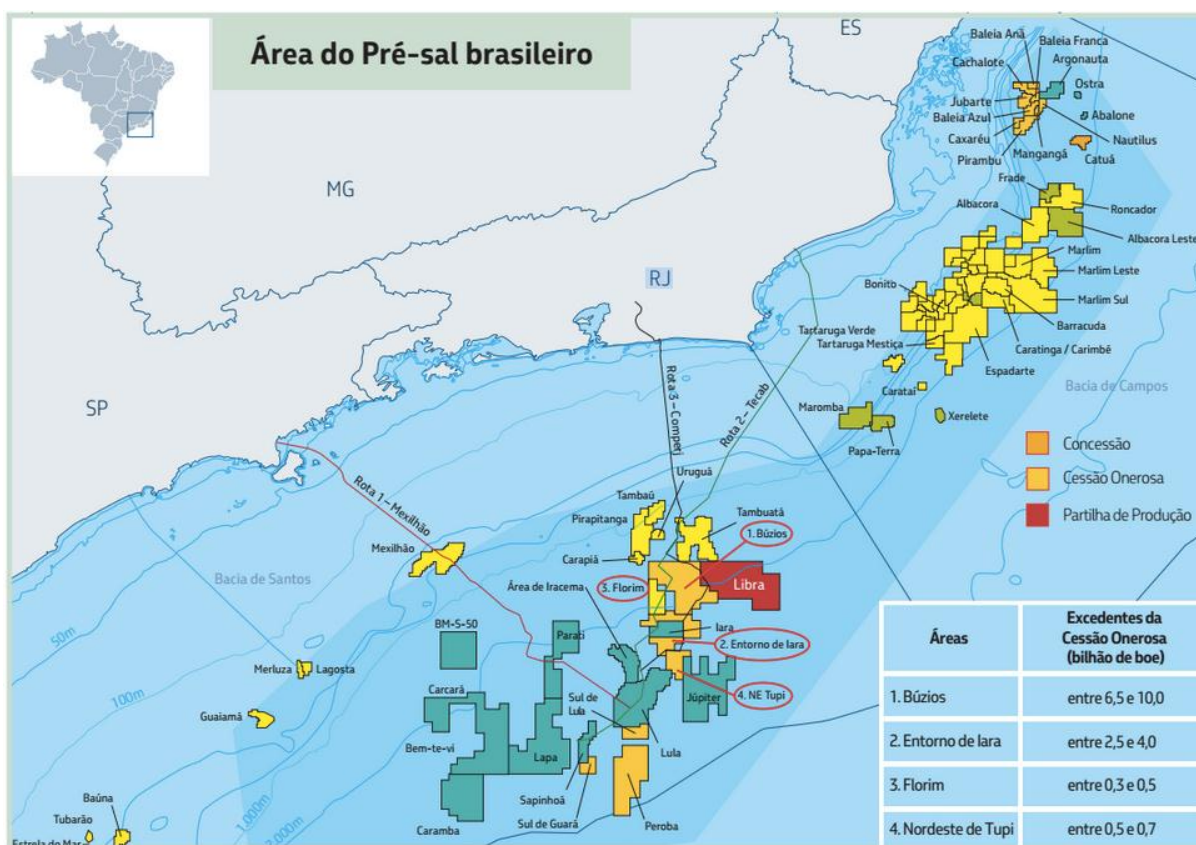


Tabela: Resolução CNPE nº 1, 24/06/2014

Fonte: PETROBRAS, 2014<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Conteúdo disponível em [www.petrobras.com.br/data/files/B8/A2/38/98/04DE6410B494DD642BF13BA8/mapa\\_grande.jpg](http://www.petrobras.com.br/data/files/B8/A2/38/98/04DE6410B494DD642BF13BA8/mapa_grande.jpg)

As profundidades de água variam desde 1000 a 2500 metros. Estas condições ambientais fazem deste reservatório um desafio para a indústria petrolífera em todos os aspectos, desde a fase de exploração até a fase de produção. As investigações já realizadas em algumas áreas do pré-sal revelaram prováveis campos gigantes e supergigantes com volumes recuperáveis de bilhões de barris de óleo equivalente (ou boe, que significa somatório de petróleo e gás natural), e potencial de ocorrência de centena de bilhões de barris de óleo equivalente, o que colocaria o Brasil entre os principais países produtores nas próximas décadas. A rocha reservatório é composta majoritariamente de calcáreo ( $\text{CaCO}_3$ ), Dolomita ( $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$ ) com presença de Estevensita. As porosidades estão na ordem de 3-18 por cento e permeabilidades na ordem de uma dezena de milidarcy ou menos. As temperaturas de formação estão ao redor de 80 graus celsius. O grau API do petróleo é de boa qualidade podendo chegar até valores de 40. A produção do pré-sal passou a marca de meio milhão de barris diários no ano de 2014.

Foi uma descoberta gigante na indústria petrolífera mundial feita em 2006 com o primeiro óleo extraído em 2008. Novas descobertas no pré-sal devem continuar nos próximos anos. O investimento é alto como também é a recompensa com poços produzindo de 30 a 50 mil barris diários.

Geologicamente a formação do pré-sal ocorreu quando da separação do continente Gondwana que originou a África e a América do Sul. As margens do Atlântico sul na África ocidental e América do Sul podem ser divididas em três províncias tectônicas e segmentos de abertura cada uma com distinta história tectônica: I-Jurássico Sul (Namíbia; Orange-Pelotas); II-Bacia salina do aptiano central (Walvis; Kwanza-Santos; Campos até Pernambuco-Douala); III-Albo equatorial-Segmento “Cenomanian strike-slip” (Anambra / Benoué-Bacia Potiguar até Amapá-Liberia)

Pré-sal é tanto um termo tectônico como estratigráfico com um significado genérico para ambos os lados do Atlântico sul, Brasil e África ocidental. Se refere a todos os estratos depositados em Bacias continentais com o advento da separação dos continentes (“rift”), antes da deposição dos estratos regionais de sal (evaporitas), durante as idades do aptiano médio e recente quando houve a separação entre o Brasil e a África. Os estratos do pré-sal estão em sequência estratigráfica normal abaixo do sal (autóctone). O termo pré-sal difere do termo sub-sal utilizado em outras Bacias no mundo, onde o sal pode ter se movido verticalmente ou lateralmente (alóctone), com estratos mais novos abaixo do sal.

No Atlântico sul, as sequências do pré-sal são do cretáceo inferior (aproximadamente pré-meio do aptiano) e foram depositadas em Bacias do tipo meio graben rift (em inglês, *half*

*graben rift basins*) na crosta continental de Gondwana. O cretáceo (em inglês, *Barremian-Neocomian-Aptiano recente*) são sucessões estratigráficas do pré-sal compostas de formações lacustres continentais, fluvial-aluvial até sucessões marítimas depositadas próximas à costa (termo em inglês *paralic-marine*). No aptiano médio para o recente, a deposição de sal começou progressivamente a dominar a sucessão estratigráfica que se desenvolveu no topo do cretáceo recente do Atlântico sul do tipo *rift half graben*. O espaço de acomodação para o sal foi criado por subsidência termal da formação sag que se desenvolveram adjacentes aos altos marginais, devido ao progressivo estiramento da crosta oceânica do Atlântico sul (ou *oceanic spreading*, em inglês).

Neste Capítulo iremos discutir a formação de Estevensita no pré-sal. Para isso vamos entender como a Estevensita aparece nas formações carbonáticas do pré-sal e em formações que vamos considerar análogas ao pré-sal

A Estevensita aparece no pré-sal de duas formas distintas:

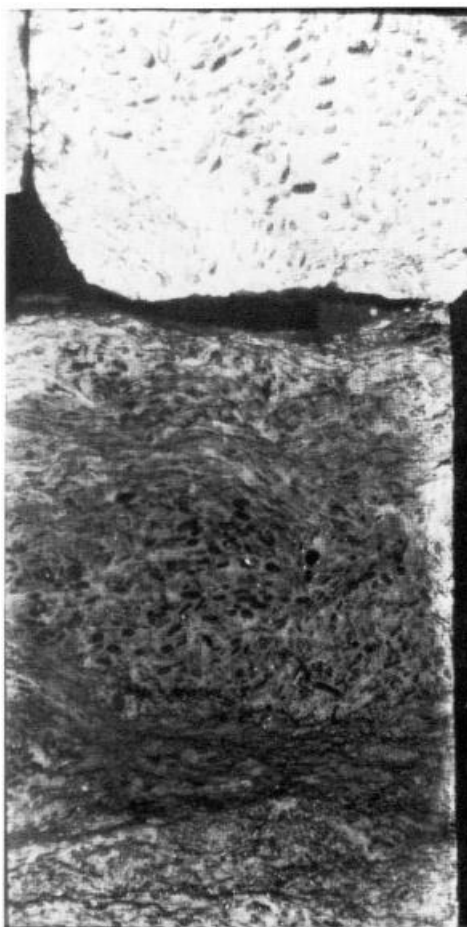
a) Nodular;

b) Deposicional; i.e., depositada entre grãos de sílica e carbonatos.

A forma nodular aparece na seção rifte do pré-sal como ocorre na formação Lagoa Feia da Bacia de Campos, que consideramos análoga ao pré-sal seção rifte (coquinas), onde a Estevensita esta associada a um processo de vulcanismo na fase inicial da abertura do Atlântico (aptiano inferior, 120-118 Ma aproximadamente). Neste caso, a Estevensita não apresenta problemas ao processo de produção destes carbonatos por aparecer de forma localizada e associada a uma fonte de calor (vulcanismo) no momento da expansão e separação dos continentes. A rocha reservatório mantém boas características de porosidade e especialmente permeabilidade e o processo de interpretação usando registros elétricos não é afetado por tratar-se de um efeito localizado que não afeta as medições feitas de forma global.

Se observa do trabalho Abrahão e Warne (1995) a estevensita em forma de oolita, como pode ser visto na na Figura 105.

Figura 105 – Estevensita Nodular (Oolites)



Legenda: Oolitos de Estevensita em matriz calcaia (parte superior do testemunho). Apenas os moldes preservados (parte inferior). 10cm de largura.

Fonte: ABRAHÃO, 1995

A Estevensita pode também aparecer de forma deposicional, a qual é mais comum no pré-sal em camadas onde este mineral se mistura com a deposição da rocha carbonática na seção sag superior (microbialitos). Neste caso, a mesma pode prejudicar a produção do reservatório por fechar a estrutura poral diminuindo de forma significativa a permeabilidade da rocha, dificultando o processo interpretativo através da análise de registros por introduzir o mineral Estevensita de forma disseminada, que pode ser confundido por Dolomita ao invés de Estevensita para o intérprete que não considere a presença desse último em seus cálculos.

Na Figura 106 é possível observar como a Estevensita se mostra de forma disseminada (fibrosa) entre os grãos de carbonatos. Importante também entender onde podemos encontrar de maneira mais expressiva este mineral dependendo da Bacia em que se encontra. No pré-sal da Bacia de Santos se encontrou as duas formas da Estevensita, sendo que de maneira importante na seção sag como mencionado anteriormente, por gerar impacto direto na rocha produtora, no entanto se observou também na seção rifte.

Figura 106 – Estevensita disseminada como aparece no pré-sal seção sag



Fonte: O autor, 2014

Na Bacia de Campos até o presente momento se encontrou Estevensita na forma nodular. Na Bacia de Santos se encontrou Estevensita em abundância na forma disseminada mas também na forma nodular. Do ponto de vista geológico havendo a presença de fontes térmicas (vulcanismo) não há porque não haver a formação da Estevensita nodular conforme mencionado anteriormente. Para a formação da Estevensita disseminada (deposicional) basta ter as condições corretas de salinidade e pH. A formação de Estevensita é favorecida em lagos salinos com alto pH e altas concentrações da razão Mg/Si. O alto pH favorece a formação de Estevensita com estruturas 2:1 sobre estruturas do tipo “ribbon” características da sepiolita. O alto pH também favorece a Estevensita com respeito a outros produtos do tipo kerolita. Se a quantidade de  $Mg^{2+}$  é limitante, o crescimento do cristal de Estevensita se detém. A salinidade é importante com alta presença de íons  $Mg^{2+}$  assim como a presença de NaCl para favorecer estruturas do tipo Estevensita com respeito aos produtos tipo kerolita. O  $Na^+$  é um constituinte importante da Estevensita, entre camadas com estrutura tetraédrica com o íon de sódio no centro do tetraedro.

Como citado anteriormente ao longo da presente dissertação, um importante trabalho que confirma a hipótese de formação de Estevensita disseminada na seção Sag do pré-sal é a tese de doutorado defendida por Sheila Aparecida Correia Furquim em 2007<sup>18</sup>, onde existe a descrição de Estevensita formada em lagos salinos do pantanal sul-mato-grossense nos dias

<sup>18</sup> FURQUIM, S. A. C. *Formação de carbonatos e argilo-minerais em solos sódicos do pantanal sul-mato-grossense*. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007



atuais. A autora descreve a formação atual de Estevensita afirmando que:

“[...] comprovam que as esmectitas magnesianas do tipo Saponita e Estevensita estão sendo originadas por precipitação química diretamente das águas superficiais da lagoa do Meio, Pantanal Sul-Mato-Grossense, Brasil.

a) presença de teores muito menores dos elementos terras raras (ETR) nas amostras enriquecidas por smectitas trioctaédricas, comparáveis aos de minerais precipitados apresentados na literatura;

b) controle do  $Mg^{2+}$  e de  $Si(OH)_4$  nas águas em concentração, sugerindo o envolvimento destes íons na formação de silicatos magnesianos;

c) equilíbrio ou supersaturação das águas da salina do Meio e seu entorno em relação aos minerais Saponita e Estevensita (conforme diagrama de equilíbrio elaborado pelo Prof. Dr. Vincent Vallés);

d) presença destes minerais trioctaédricos apenas no horizonte superficial 2, situado na zona de maior variação sazonal do nível superficial da salina.

[..] é possível a neoformação de esmectitas magnesianas do tipo Saponita e Estevensita em ambientes sujeitos a concentração evaporativa. Este resultado contraria as posições de Eugster & Hardie (1978) e Jones (1986), que acreditam que as únicas fases que se originariam pela nucleação direta a partir das águas seriam a sepiolita, a magadita e o talco. Por outro lado, concorda com os resultados de outros autores, como por exemplo, Tettendorst & Moore (1978), Velde (1985) e Torres Ruiz et al. (1994), que também reconheceram a formação da Saponita, Estevensita e; ou paligorsquita por precipitação química em águas em processo de concentração.”

Outras publicações foram analisadas para confecção da tese e conclusões finais, tais como os trabalhos de Keller (1985); Rehim et al (1986); Faust e Murata (1953); Randal (1959) e Rhouta et al (2008).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após este trabalho, devemos considerar que a análise litológica no pré-sal passa a incluir o mineral Estevensita nas interpretações petrofísicas de uma forma holística.

Consideramos que há um trabalho extenso de utilização da metodologia em uma maior quantidade de poços do pré-sal, a fim de aprimorar esta metodologia com uma maior base de dados. Dispondo de uma maior base de dados será possível refinar as estatísticas, uma vez que, um dos desafios ao método é poder detectar com precisão os menores volumes possíveis de Estevensita na rocha reservatório. Geologicamente falando, se sabe que quanto maior a quantidade de Estevensita na rocha reservatório menor será a porosidade real da rocha e menor sua permeabilidade.

Quantificar dados de petrofísica utilizando a metodologia proposta neste trabalho e comparar com dados de produção reais de poço é um trabalho interessante para futuros progressos que merece ser considerado.

Outro assunto de vital importância é fazer as análises de laboratório com testemunhos do pré-sal, que aqui foram realizadas com os da Lagoa Feia e das duas amostras vindas dos Estados Unidos, Nova Jersey, da mistura Pectolita e Estevensita, no intuito de ajustar os pontos críticos. Outro campo que poderá ser explorado em pesquisas futuras será a resposta da Estevensita com respeito às ferramentas sônicas de registros que não foi tratada neste trabalho.

A Estevensita deve apresentar uma velocidade baixa, i.e., altos delta T's, tanto com respeito à onda compressional, como com respeito à onda de cisalhamento (ou *shear*, em inglês). No entanto, é preciso comprovar esta informação, determinar os pontos críticos da Estevensita e incluir no processamento holístico aqui apresentado onde não se incluiu informação sônica. Os pontos críticos (*end points*) a preencher na Figura 103 são delta T compressional (em inglês, *compressional slowness*) e delta T cisalhamento (em inglês *shear slowness*) para usar a informação sônica de registros seja a cabo (*wireline*) ou LWD com os programas probabilísticos.

Finalmente, outra possível extensão deste trabalho é fazer uma análise comparativa do pré-sal brasileiro e africano com respeito à quantificação do mineral Estevensita em ambos os lados do Atlântico.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma nova metodologia a fim de prover ferramentas para a indústria petrolífera brasileira produzir e avaliar mais efetivamente as reservas do pré-sal.

Como produto principal disponibilizou nova metodologia para a indústria petrolífera avaliar através de registros, a complexa litologia do pré-sal e suas particularidades não encontradas em outras rochas carbonáticas ao redor do mundo que é a presença do mineral Estevensita.

Foi executado um detalhado estudo na Formação Lagoa Feia donde se conclui tratar-se de um análogo do pré-sal seção rifte.

A partir da análise detalhada da Formação Lagoa Feia, respostas de registros no pré-sal e extensa bibliografia, se propõe uma teoria para a formação da Estevensita no pré-sal que pode ser da forma nodular ou deposicional, sendo que a forma nodular aparece tanto na seção rifte do pré-sal assim como na Formação Lagoa Feia. Encontra-se a formação da Estevensita deposicional na seção sag do pré-sal.

O estudo de laboratório das amostras não puras de Estevensita, estudo da bibliografia disponível e análise de sensibilidade no caso da porosidade neutrônica permitiram determinar os pontos de material puro da Estevensita (*end points*). Uma vez com estes dados se pode aplicar o método descrito passo a passo no apêndice que pode ser utilizado com qualquer programa petrofísico tipo estocástico, no caso deste trabalho se utilizou Techlog, no entanto a metodologia pode ser implementada em qualquer outro programa que considera todas as entradas para resolução dos volumes da formação, tanto os volumes de rochas como os volumes de fluidos.

Finalmente, se usou a metodologia desenvolvida para análise em poços do pré-sal onde não se pode mostrar os registros em si por tratar-se de dados confidenciais assim como a informação de testemunhos. No entanto foi possível fazer uso da metodologia apresentada, e comparar qualitativamente a capacidade do método aplicado em encontrar valores apreciáveis de Estevensita que no caso são acima de 10% em volume e com erros não superiores a 4% nesta qualificação em valores da ordem de 35% de volume de Estevensita. No caso dos poços analisados a quantificação pela metodologia foi sempre para menos usando o método aqui aplicado do que os valores reportados nos testemunhos. Este trabalho leva em consideração todos os dados obtidos com registros a fim de determinar, apesar de ambos minerais apresentarem magnésio, os diferentes volumes de Estevensita e Dolomita ou uma mistura

destes minerais pois usa uma metodologia que considera todas as entradas possíveis de forma global. Importante ressaltar que é fundamental para uma melhor análise com a nova metodologia utilizar não somente registros básicos tais como: raios gama, resistividade, densidade, porosidade neutrônica e volume fotoelétrico, mas também os registros especiais de ressonância magnética e espectroscopia induzida. Muito embora tenha sido possível obter resultados aceitáveis apenas com os registros básicos porém de maneira mais qualitativa do que quantitativa devido a ampliar os erros comparados com os valores do testemunho. No entanto, incluindo dados de espectroscopia induzida ao modelo e ressonância magnética se obteve os valores quantitativos reportados neste trabalho. Todas as entradas são respeitadas nesta metodologia, no entanto é fundamental para se considerar o melhor resultado possível dispor de dados de neutrão, ressonância magnética, fator volumétrico e espectroscopia induzida.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, D. *Well-log signatures of alluvial-lacustrine reservoirs and source rocks of the Lagoa Feia Formation, Lower Cretaceous, Campos basin, offshore Brazil*. 1988. 279f. Ph. D. Thesis 3589. Colorado School of Mines, Golden, Colo., 1988.
- ABRAHÃO, D.; WARME, J. E. Lacustrine and Associated Deposits in a Rifted Continental Margin-Lower Cretaceous Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Offshore Brazil. In: KATZ, Barry J. (Ed.). *Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs*. [S.l.]: American Association of Petroleum Geologists, 1990. p. 287-305. (AAPG Memoir, v. 50).
- ARCHIE, G.E. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, n. 36, v.2, p. 278–298, 1952.
- \_\_\_\_\_. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of AIME*, v.146, p. 54–62, 1942.
- BERTANI, R. T.; CAROZZI, A. V. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, Offshore Brazil—Rift valley stage lacustrine carbonate reservoirs, I. *Journal of Petroleum Geology*, v. 8, n. 1, p. 37-58, 1985a.
- \_\_\_\_\_. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, Offshore Brazil—Rift valley stage lacustrine carbonate reservoirs, II. *Journal of Petroleum Geology*, v. 8, n. 2, p. 199-220, 1985b.
- BIZZI, L. A. et. al. *Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil/CPRM, 2003. p. 541-575.
- BP. *Statistical Review of World Energy*. 63. ed. Jun. 2014. 48p. Disponível em: <[www.bp.com/review](http://www.bp.com/review)>. Acesso em: 15 ago. 2014.
- BRADLEY, W. H.; FAHLEY, J. J. Occurrence of stevensite in the Green River Formation of Wyoming. *American Mineralogist*, v. 47, p. 996-998, 1962.
- BRANDÃO, J.A.S.L.; GUARDADO, R.L. A exploração de petróleo no Brasil In: TAHA, M. (ed.). *Searching for oil and gas in the land of giants*. Buenos Aires: Schlumberger, 1998. p. 2-14.
- BRICE, S. E. M. D. et al. Tectonics and sedimentation of the South Atlantic rift sequence—Cabinda, Angola. In: Watkins, J. S.; Drake, C. L.(eds.). *Studies in continental margin geology*. AAPG Memoir 34, p. 5-18, 1982.
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. *Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification*. London: Mineralogical Society, 1980. 495 p. (Monograph, v. 5).
- BURKE, K. Atlantic evaporites formed by evaporation of water spilled from Pacific, Tethyan, and Southern oceans. *Geology*, v. 3, p. 613-616, 1975.

CANDIDO, A.; CORÁ, C.A.G. The Marlim and Albacora giant fields, Campos Basin, Offshore Brazil. In: THOMAS, M. (ed.). *Giant oil and gas fields of the decade 1978-1988*. Tulsa: AAPG, 1990. p. 125-135.

CHAHY, A. et al. Diagenetic transformation of dolomite into stevensite in lacustrine sediments from Jbel Rhassoul, Morocco. *Journal of Sedimentary Research*, v. 69, p. 1123-1135, 1999.

CHAHY, A. et al. Textural transition and genetic relationship between precursor stevensite and sepiolite in lacustrine sediments (Jbel Rhassoul, Morocco). *Clays and Clay Minerals*, v. 45, p. 378-389, 1997.

CHAHY, A.; DUPLAY, J.; LUCAS, J. Analyses of palygorskite and associated clays from the Jbel Rhassoul (Morocco): chemical characteristics and origin of formation. *Clays and Clay Minerals*, v. 41, p. 401-411, 1993.

DOUST, H.; OMATSOLA, E. Divergent/Passive Margin Basins. In: EDWARDS, J. D. and SANTAGROSSI, P. A. (Eds.) *AAPG Memoir 48*, p. 201-238, 1990.

EUGSTER, H. P.; HARDIE, L. A. Saline lakes. In: LERMAN, A. (ed.). *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. New York: Springer, 1978. p. 237-289.

FAUST, G. T.; MURATA, K. J. Stevensite redefined as a member of the montmorillonite group. *American Mineralogist*, v. 38, p. 973-987, 1953.

FAUST, G.T.; HATHAWAY, J.C.; MILLOT, G. A restudy of stevensite and allied minerals. *The American Mineralogist*, v. 44, mar./apr., 1959.

FLAUM, C.; PIRIE, G. Determination of Lithology from Induced Gamma-Ray Spectroscopy. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 22., 1981, México. *Presented...* México: SPWLA, 1981. p. 23-26.

FLEISCHER, M. New mineral names. *American Mineralogist*, v. 40, 137p., 1955.

FURQUIM, S. A. C. *Formação de carbonatos e argilo-minerais em solos sódicos do pantanal sul-mato-grossense*. 2007. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GEOPOLÍTICA DO PETRÓLEO. *Desafios para a marinha do brasil nos próximos anos*. 2012. Disponível em: <<https://geopoliticadopetroleo.wordpress.com/2012/01/04/desafios-para-a-marinha-do-brasil-nos-proximos-anos/>>. Acesso em: 23 maio 2014.

GLENN, M. L. *Amer. Min.*, v. 1, p. 44, 1916.

GRAU, J.A. et al. A Geological Model for Gamma-Ray Spectroscopy Logging measurements. *Nuclear Geophysics*, v. 3, n. 4. p. 351-359, 1989.

GRIFFITHS, R. *EcoScope User's Guide*. Houston: Schlumberger, 2010. ISBN 978-097885308-2.

GUARDADO, L. R.; GAMBOA, L. A. P.; LUCCHESI, C. F. Divergent/Passive Margin Basins. In: EDWARDS, J. D. and SANTAGROSSI, P. A. (Eds.) *AAPG Memoir 48*, 1990.

GUIA DA CARREIRA, 2010. *Pré-sal brasileiro*. Disponível em: <<http://www.guiadacarreira.com.br/atualidades/pre-sal-brasileiro/>>. Acesso em: 12 fev. 2014.

GUVEN, N.; CARNEY, L. L. The hydrothermal transformation of sepiolite to stevensite and the effect of added chlorides and hydroxides. *Revista Clays and Clay Minerals*, v. 27, n. 4, p. 253-260, 1979.

HARPER, J. A. Why the drake well. *Pennsylvania geology*, v. 29, n. 1, p.2-4, 1988.

HAYASHI, et al. Characterization of high-surface area smectite-supported cobalt oxide catalysts for hydrodesulfurization by means of TPR, TPS and ESR. *Applied Catalysis A: General*, v.179, p. 2013 – 216, 1999.

HERRON, S.L.; HERRON, S.M. Quantitative Lithology: An application for Open and Cased Hole Spectroscopy. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 37., 1996. New Orleans, Louisiana. *Conference Paper...* New Orleans, Louisiana: SPWLA, 1996.

JONES, B. F. Clay mineral diagenesis in lacustrine sediments. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, v. 1578, 291-300, 1986.

KELLER, W.D. The nascence of clay minerals. *Clay and Clay Minerals*, v. 33, p. 161-172, 1985.

MINDAT. *Mineral Database. Estevensita*. Disponível em: <<http://www.mindat.org/min-3770.html>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

OFFSHORE-MAG. *Geological similarities with Brazil's pre-salt attract investments to Africa*. 2010. Disponível em: <<http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-70/issue-7/latin-america/geological-similarities-with-brazils-pre-salt-attract-investments-to-africa.html>>. Acesso em: 30 abr. 2014.

OIL HISTORY PHOTO ALBUM. *Lower Pioneer Run wells along Oil Creek in early 1860s*. Disponível em: <[http://little-mountain.com/oilwell/Media/album/lower\\_pioneer\\_run.jpg](http://little-mountain.com/oilwell/Media/album/lower_pioneer_run.jpg)>. Acesso em: 21 mar. 2014.

PETROBRAS. *Mapa da área do pré-sal brasileiro*. 2014. Disponível em: <[http://www.petrobras.com.br/data/files/B8/A2/38/98/04DE6410B494DD642BF13BA8/map\\_a\\_grande.jpg](http://www.petrobras.com.br/data/files/B8/A2/38/98/04DE6410B494DD642BF13BA8/map_a_grande.jpg)>. Acesso em: 12 maio 2014.

PORTAL BRASIL, *Matriz energética*. 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

RANDALL, B. A. O. *Stevensite from the Whin Sill in the region of the North Tyne*. Department of Geology, King's College, Newcastle-upon-Tyne, University of Durham. 29 jan.1959.

RANGEL, H.D. *Carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos*. 1993.

REHIM, H. A. A. et al. Talco e Estevensita na Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos – Possíveis implicações no ambiente deposicional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, Goiânia, GO. *Anais ...* Goiania, GO: SBG, 1986.

RHOUTA, B. et al. Elucidating the crystal-chemistry of Jbel Rhassoul stevensite (Morocco) by advanced analytical techniques. *Clay Minerals*, v. 43, p. 393-403, 2008.

TEISSERENC, P.; VILLEMIN, J. Divergent/Passive Margin Basins. In: EDWARDS, J. D. and SANTAGROSSI, P. A. (Eds.) *AAPG Memoir 48*, p. 177-199, 1990.

TETTENHORST, R.; MOORE, E.M. Stevensite oolites from the Green River Formation of Central Utah. *J. Sed. Pet.*, v. 48, p. 587-594, 1978.

TORRES-RUIZ, J. et al. Geochemistry of Spanish sepiolite-palygorskite deposits: genetic considerations based on trace elements and isotopes. *Chem. Geol.*, v. 112, p. 221-245, 1994.

U.S ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, *Short-term energy and winter fuels outlook*. 2013. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/steo/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

VELDE, B. *Clay Minerals: A physico-chemical explanation of their occurrence*. Amsterdam: Elsevier, 1985. 427p.

WELLER, G. et al. A New Integrated LWD Platform brings Next-Generation Formation Evaluation Services. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 46., 2005. New Orleans, Louisiana. *Conference Paper...* New Orleans, Louisiana: SPWLA, 2005.

WESTAWAY, P.; Hertzog, R.; PLASEK, R.E. *Nêutron-Induced Gamma Ray Spectroscopy for Reservoir Analysis*. [S.l]: SPE, 1983. p 553-564.

WILSON, M.J. Rock-forming Minerals: Sheet silicates: clay minerals. *The Geological Society*, London, v. 3C, p. 344, 2013.

WIKIPEDIA. *List of countries by oil consumption*. 2013. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_oil\\_consumption](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_oil_consumption)>. Acesso em: 13 abr. 2014.

WIKIPEDIA. *List of countries by oil production*. 2013. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_oil\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_oil_production)>. Acesso em: 13 abr. 2014.

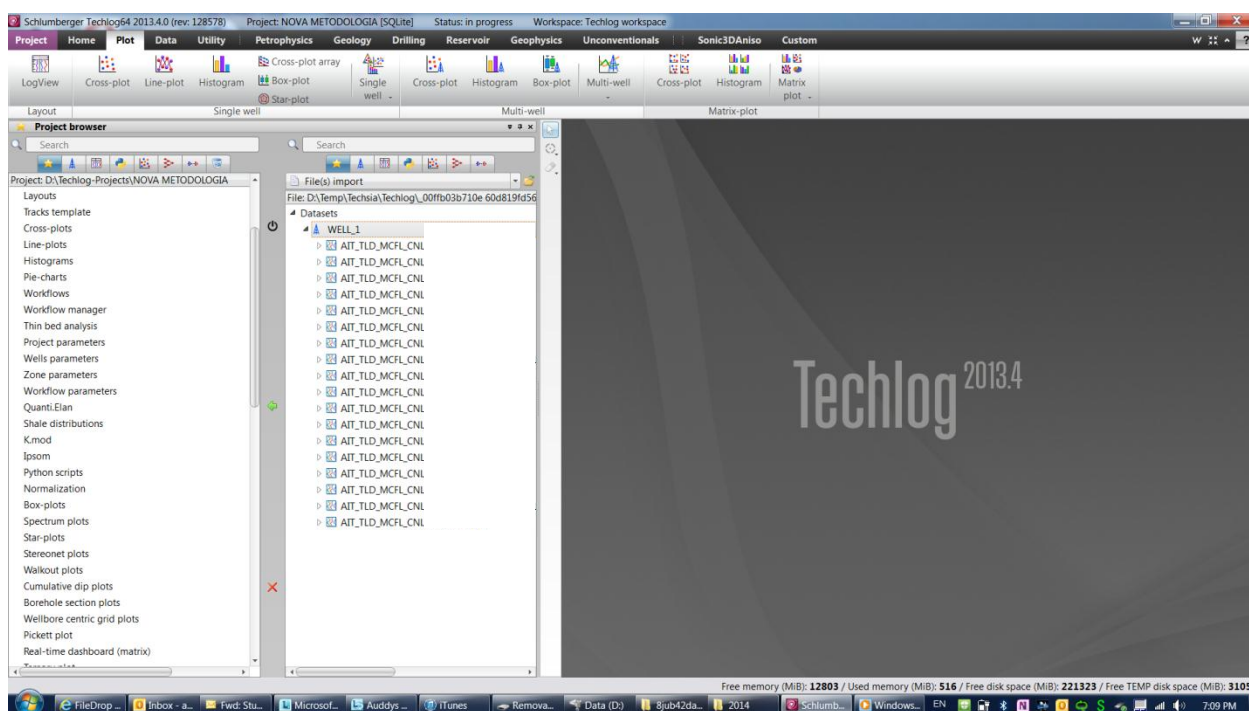


## APÊNDICE - Algoritmos do Techlog: Passo a passo da implementação computacional da nova metodologia

Este apêndice tem como objetivo descrever como implementar a nova metodologia para incluir o mineral estevensita nos poços do pré-sal usando um programa de petrofísica probabilístico. Neste caso se utilizou o programa Techlog (Schlumberger trademark), no entanto pode ser implementado em qualquer programa estocástico.

O primeiro passo é carregar os dados que serão utilizados. Neste caso foram carregados os dados de cabo combo triplo, espectroscopia induzida e ressonância magnética como se vê no *screenshot* da Figura 107 abaixo.

Figura 107– Passo 1 Carregando os Dados

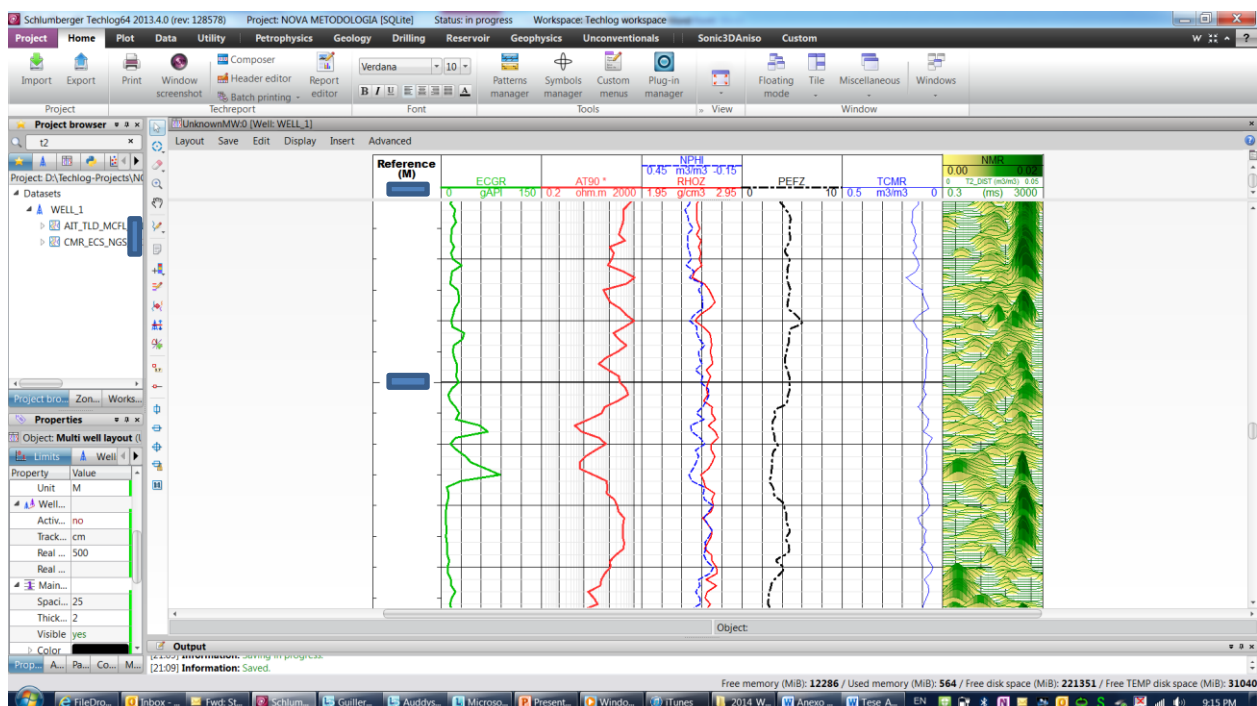


Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando o primeiro passo, referente ao carregamento de dados.

Fonte: O autor, 2014

Uma vez os dados carregados no sistema há que plotar estes dados, como pode ser visto no *screenshot* da figura 108, e fazer um controle de qualidade afim de definir quais dados devem ser usados na interpretação petrofísica que neste caso em Techlog se chama Quanti-Elan.

Figura 108 – Passo 2 Controle de Qualidade dos Dados

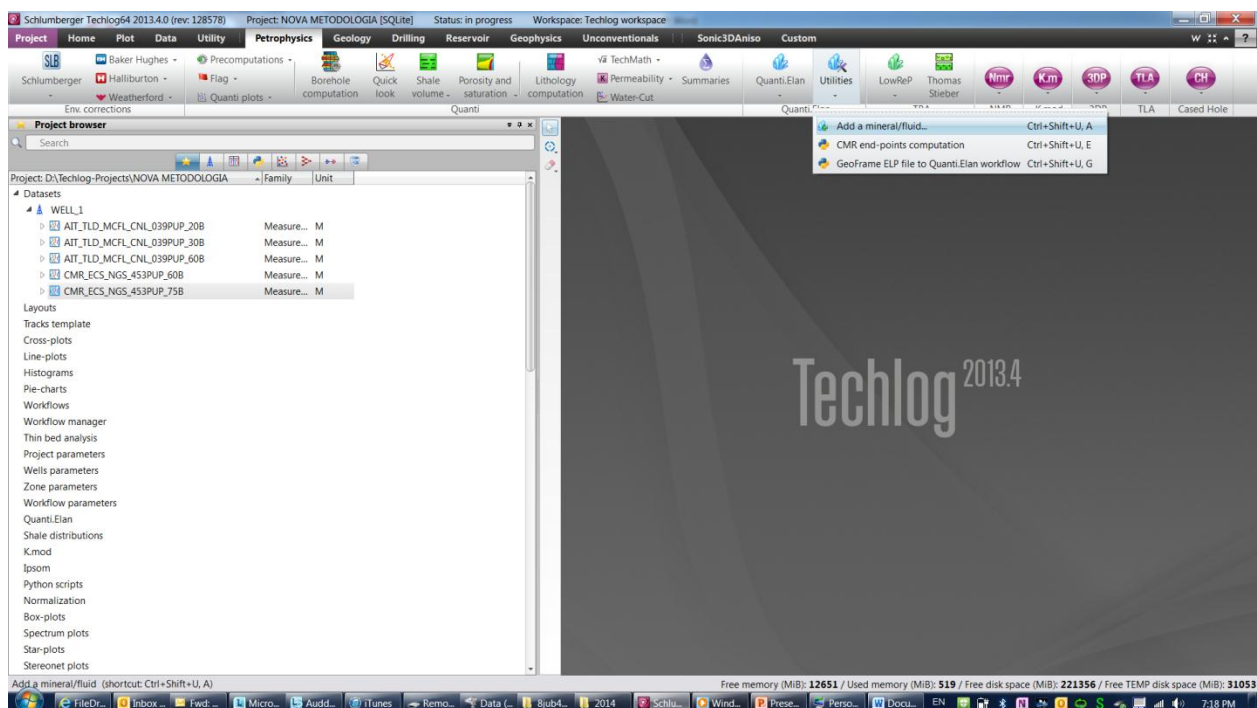


Legenda: *Screenshot* da área de trabalho do software Techlog mostrando o segundo passo, referente ao controle de qualidade dos dados.

Fonte: O autor, 2014

O seguinte passo é definir para o sistema o novo mineral Estevensita com os pontos do material puro (*end points*) que foram definidos nesta tese de doutorado na tabela 51 para poder adicionar o novo mineral na interpretação petrofísica. As (Figuras 109, 110 e 111) nas páginas seguintes ilustram a adição do novo mineral estevensita e o preenchimento da tabela no programa petrofísico de acordo com a tabela 51 desta tese.

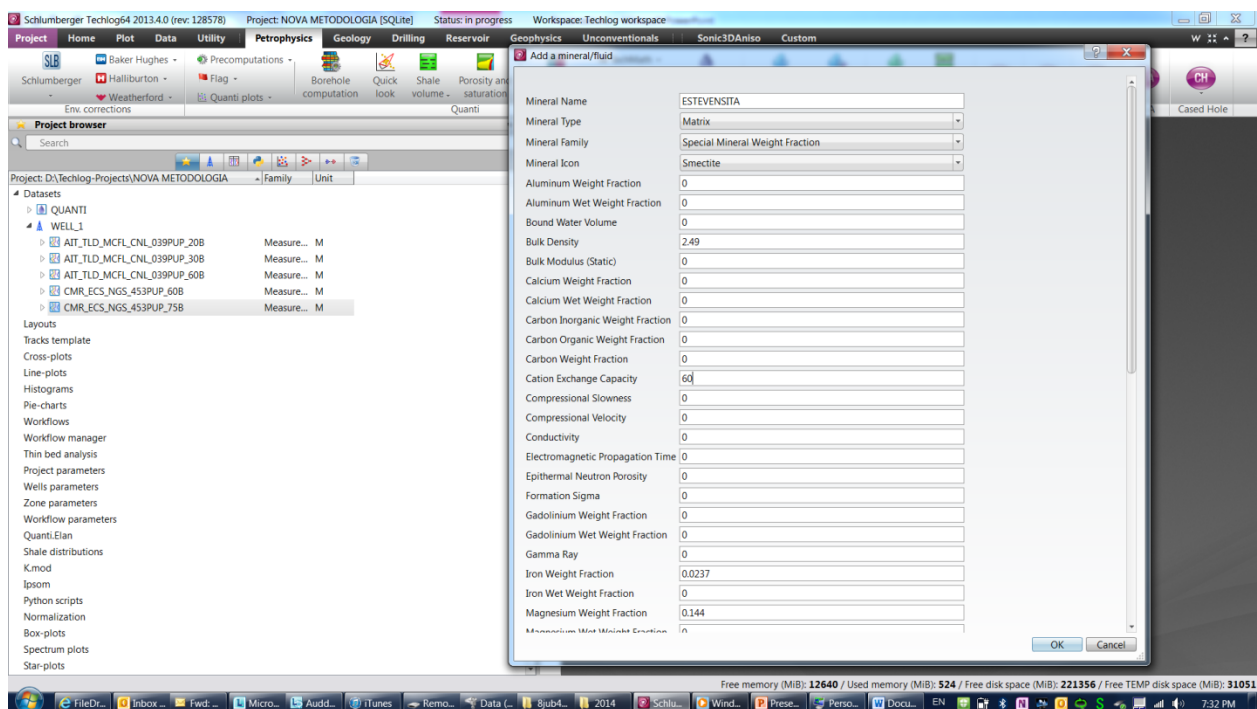
Figura 109 – Passo 3 Adicionar Mineral Estevensita no Sistema



Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando a primeira etapa do terceiro passo, referente a adição do mineral Estevensita ao sistema.

Fonte: O autor, 2014

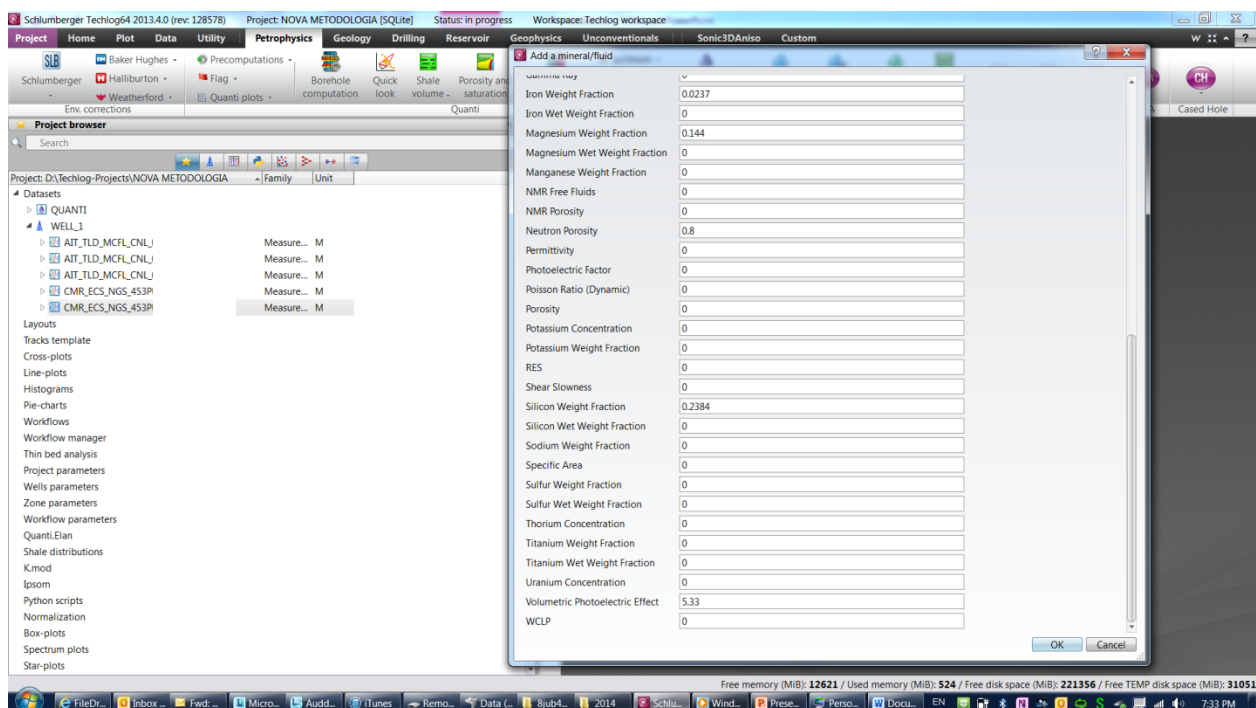
Figura 110 – Passo 3A Adicionar Mineral Estevensita no Sistema



Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando a segunda etapa do terceiro passo, referente a adição do mineral Estevensita ao sistema.

Fonte: O autor, 2014

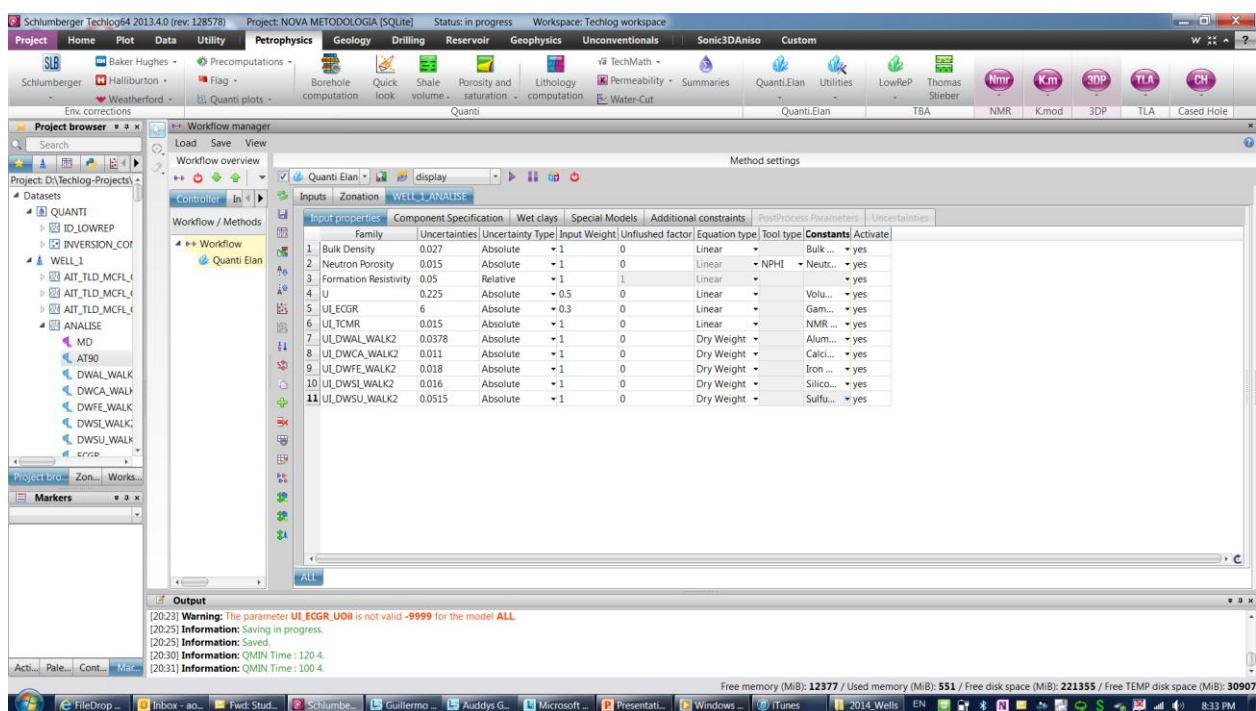
Figura 111 – Passo 3B Adicionar Mineral Estevensita no Sistema



Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando o primeiro passo, referente ao carregamento de dados, os parâmetros a serem preenchidos são exibidos na tabela 5.1.

Fonte: O autor, 2014

Figura 112 – Passo 4 Selecionar dados de entrada



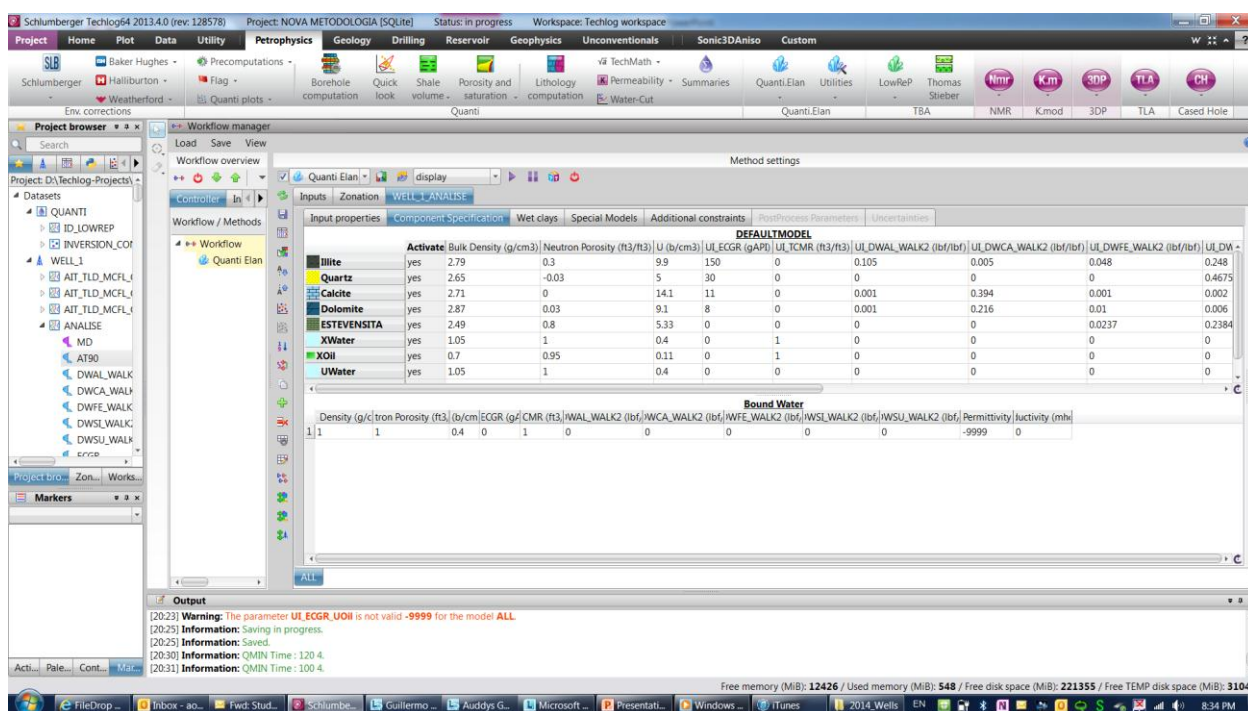
Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando o quarto passo, referente a seleção dos dados de entrada

Fonte: O autor, 2014

O quarto passo é entrar no software de interpretação Quanti-Elan neste caso e selecionar os dados de entrada como indicado na figura 112, na página anterior. Neste caso se usou toda a gama de dados disponíveis como indicado nesta tese, ou seja, dados de resistividade, raios gama, fator volumétrico, densidade, neutrão, espectroscopia induzida e ressonância magnética como dados de entrada.

O quinto passo é decidir para quais volumes se deseja que o programa faça a resolução do problema petrofísico. Neste caso se utilizaram os volumes de rochas encontradas no pré-sal (dolomita, calcita, estevensita, areia, folhelho ilita e os volumes de petróleo e água tanto na zona invadida quanto na zona virgem), como mostrado na figura 113 abaixo.

Figura 113 – Passo 5 Selecionar os volumes a serem calculados

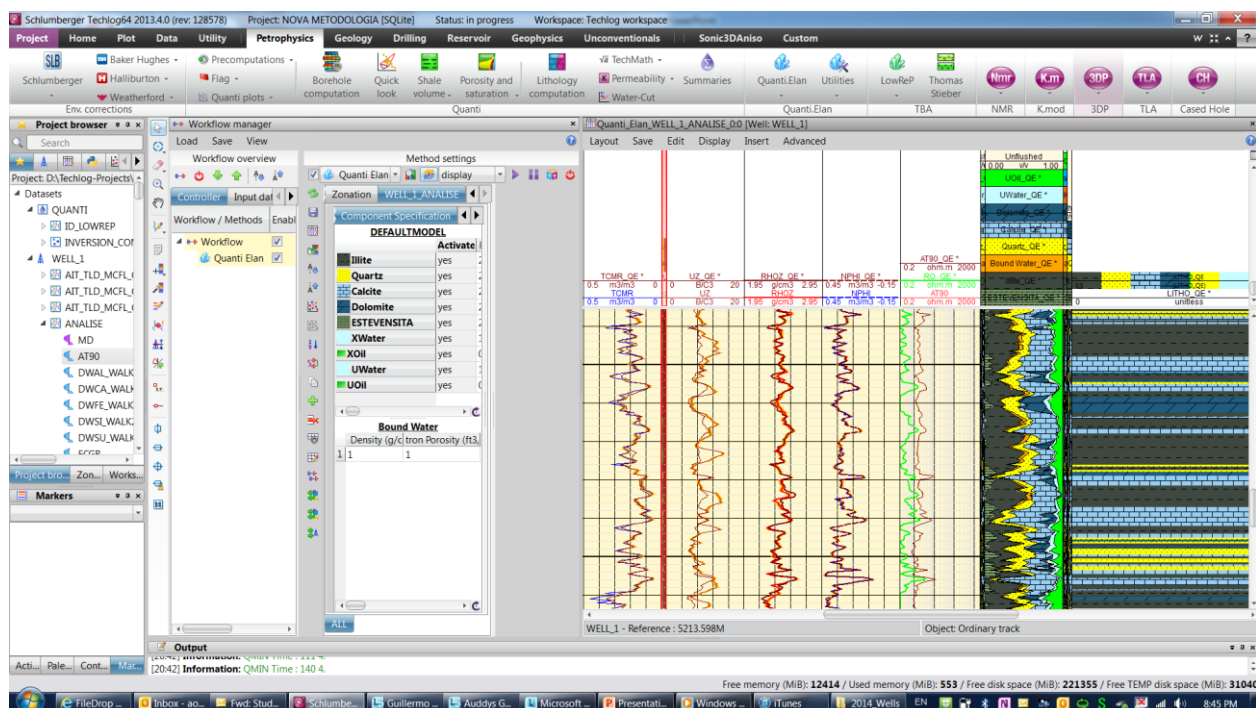


Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando o quinto passo, referente a seleção de volumes a serem calculados.

Fonte: O autor, 2014

O sexto e último passo é selecionar os parâmetros de salinidade da formação e decidir qual será a equação petrofísica a ser utilizada, neste caso por tratar-se de formação limpa do pré-sal, se utilizou a equação simples de Archie e se executa o programa a fim de que este faça os cálculos de volume como se mostra na figura 114 abaixo.

Figura 114 – Passo 6 Selecionar equação de Saturação e Salinidade



Legenda: Screenshot da área de trabalho do software Techlog mostrando o sexto passo, referente a seleção da equação de saturação e salinidade.

Fonte: O autor, 2014