



## Interpretação Sísmica na Área Sul da Bacia do São Francisco e correlação com a Área Norte

Vinicius Carneiro Santana\*, Jose Luís Huerga, Esteban A. Sabogal, Paulo A. S. Vidigal e Michael Holz, (GETA/UFBA)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

**The seismic interpretation is one of the final stages of a geophysical study of seismic reflection, being applied in several areas, with a greater focus on the oil industry. The interpreter based on a set of seismic data whether they are 2D or 3D using tools like seismic attributes, sequences stratigraphy or AVO (Amplitude versus Offset), correlating with surface geological elements and wells to propose a model where it is possible to predict hydrocarbon traps. In this work, we apply a basic workflow of seismic interpretation in a set of 2D lines in the south area of the São Francisco Basin, and using seismic stratigraphy and complex trace seismic attributes, as well as the association with gravimetric maps, geologic maps and tie well to seismic, in order to interpret structures and correlates them with the surface map; to map unconformity and seismic sequences and associate them to the stratigraphic framework of the São Francisco basin. In the final step, aggregating all data is created a chronology of extensional and compressional generator events of sequences that make up the south area of the basin and its indicators on seismic, as well as a comparison with the north area.**

### Introdução

A Bacia do São Francisco é uma bacia proterozóica localizada no cratón homônimo, com cerca de 371.000 km<sup>2</sup> que compreende principalmente os estados de Minas Gerais e Bahia e secundariamente Tocantins, Goiás e Distrito Federal. Durante a sua formação passou por vários eventos tectônicos compressivos e distensivos o que gerou uma bacia repleta de estruturas, principalmente nas bordas onde ocorrem a Faixa Brasília (a oeste), Faixa Araçuá (a leste), Faixa Rio Preto e Corredor de Deformação do Paramirim (ambos ao norte). Os diferentes eventos tectônicos que deram origem a bacia geraram cada um, sequências sedimentares de primeira ordem, com características estratigráficas e estruturais distintas: Rifte/Sag Espinhaço, Rifte/Margem Passiva Canastra/Paranoá/Macaúbas, Intracratônica/Foreland Bambuí, Intracratônica Fanerozóica; as quais podem ser entendidas como bacias empilhadas.

Do ponto de vista exploratório, esse trabalho está inserido no âmbito do Projeto BAFRAN, cooperação técnico

científica realizada entre a Agência Nacional do Petróleo e o GETA/UFBA (Grupo de Estratigrafia Teórica e Aplicada) com o objetivo de estudar a área norte da Bacia e correlacioná-la com a área sul, a fim de delimitar blocos de exploração. Atualmente a área norte está sem interesse após a conclusão de um poço que encontrou embasamento raso, além de não encontrar rochas geradoras; e a área sul encontra-se com a exploração paralisada devido à falta de diretrizes para a técnica de fraturamento hidráulico necessária para a produção dos reservatórios.

### Metodologia

A estratigrafia de sequências estuda as mudanças nos padrões de empilhamento em resposta a interação entre o espaço de acomodação disponível e o aporte sedimentar. Ela constitui uma ferramenta de análise estratigráfica que permite identificar, e definir, a sucessão espacial e temporal e pacotes geneticamente relacionados, ou sequências deposicionais, e definir superfícies que guardam a relação direta com o processo de formação da bacia.

O modelo clássico da estratigrafia de sequências foi construído com base em estudos desenvolvidos em bacias de margem passiva, que estão associadas ao Mesozóico. Com o passar do tempo e desenvolvimento dessa ferramenta, os seus conceitos foram sendo adaptados e aplicados a bacias com outros estilos tectônicos e idade. Nesse contexto é que estão as bacias Pré-Cambrianas, pois devido a sua idade e características sedimentológicas e estratigráficas como pobre preservação estratal, exige um modelo específico. Dessa forma nesse tipo de bacia não é comum a identificação de tratos de sistemas, sendo apenas observadas discordâncias.

### Análise dos Dados

Foram utilizados nesse trabalho um conjunto de trinta linhas sísmicas, três poços e um levantamento gravimétrico, ambos na área sul da bacia do São Francisco (Figura 1), além de um conjunto de linhas e dois poços da área norte para comparação.

Através das análises, foram delimitadas três discordâncias de primeira ordem e sete de segunda ordem, utilizando critérios da sismoestratigrafia, eventos tectônicos detectados em sísmica, morfologia das sequências sísmicas e sua representação em superfície. Três Sequências deposicionais de primeira ordem foram identificadas na área norte, sendo cada sequência deposicional associada a uma fase tectônica da bacia.

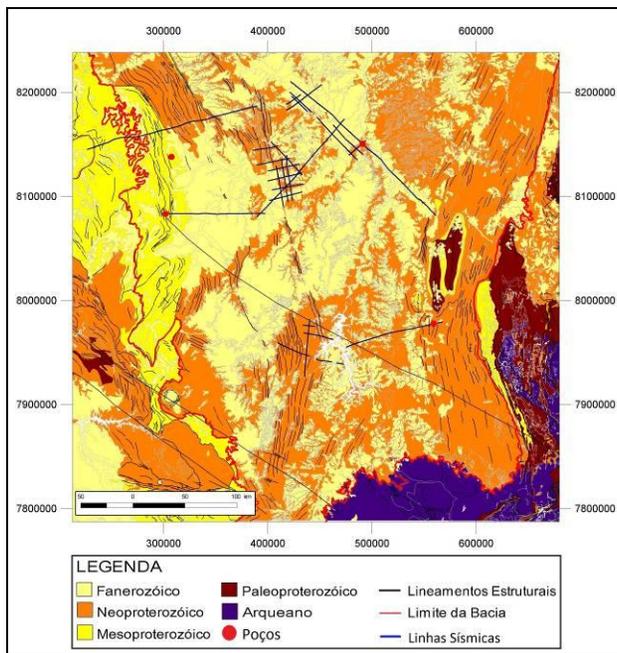


Figura 1: Mapa geológico da área Sul da Bacia do São Francisco, com os dados sísmicos e poços utilizados.

**Embasamento**

O embasamento foi mapeado através de linhas sísmicas empilhadas que mostravam uma série de reflexões com altas amplitudes e difrações na parte inferior, além das fácies sísmicas caóticas. Esses refletores são correlacionados com o embasamento aflorante nos limites sul e leste da bacia. O mapa de contorno estrutural sísmico do embasamento (Figura 2) mostra dois altos estruturais mapeados, um no extremo sul da bacia e outro no nordeste. Esses altos estruturais já haviam sido previstos por *Ortu et al (1990) apud Alkmim e Martins Neto (2001)* com base em dados gravimétricos.

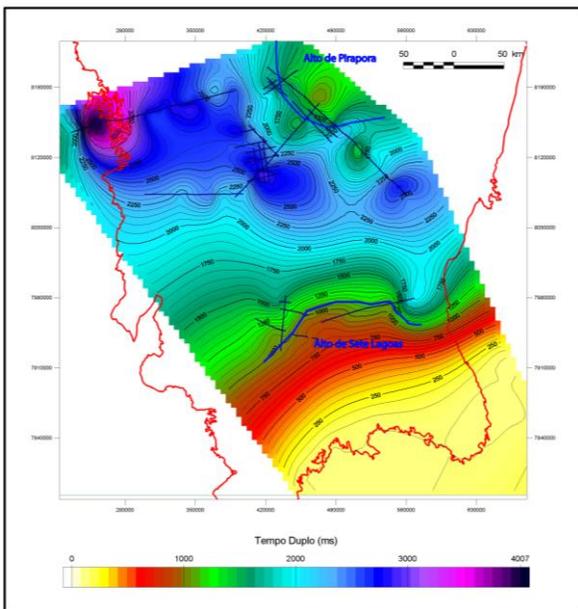


Figura 2: Mapa de contorno estrutural sísmico, mostrando a morfologia do embasamento.

**Sequência Depositional 1**

A SEQ-1 é uma sequência deposicional de primeira ordem que devido as suas características de rifte é associada à abertura do continente Atlântica na Tafrogênese Estateriana agrupando o que litologicamente é chamado na literatura de Supergrupo Espinhaço e Araí. Essa sequência chamada aqui de Sequência Espinhaço é limitada no topo pela discordância D1, mapeada por uma série de truncamentos que ocorrem principalmente na região leste da bacia, além de apresentar dobras com comprimentos de onda diferentes, que ficam mais evidentes quando a discordância superior é horizontalizada. Tal característica está associada à existência de um evento compressivo anterior aos processos formadores da Faixa Araçuaí que provavelmente atuou na inversão do rifte. Essa sequência foi pouco afetada por tectonismo posterior, exceto na região leste na Faixa Araçuaí onde o esforço compressivo atuou na formação de um sistema de dobras elevando-a até superfície (Região da Serra da Água Fria) e na região noroeste onde o esforço do brasileiro inverteu falhas normais.

A sequência desenvolveu suas maiores espessuras em três principais regiões, no segmento central, no segmento sudeste e no segmento noroeste (Figura 3) da área sul. No segmento central o rifte tem uma direção NW-SE, com padrão simétrico, onde refletores de alta amplitude angulosos na base tendem a horizontalizar em direção ao topo, característica de estratos de crescimento, sugerindo que essa sequência é sintectônica.

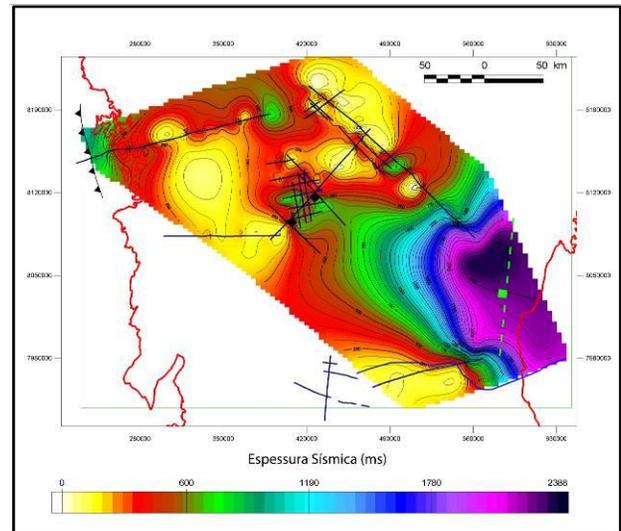


Figura 3: Mapa de Espessura Sísmica da SEQ-1 com alguns elementos estruturais.

No segmento leste o rifte tem uma morfologia diferente, ele é assimétrico em formato de meio gráben tendo características típicas de inversão. A borda flexural está na parte noroeste da linha (Figura 4) a partir da qual o rifte aprofunda através de falhas normais até a borda falhada na parte sudeste. As características de inversão são claras, anticlinal no topo da sequência e refletores internos dobrados, semelhante aos modelos físicos apresentados por *Schlische e Withjack (2007) apud Hercos et. al.*

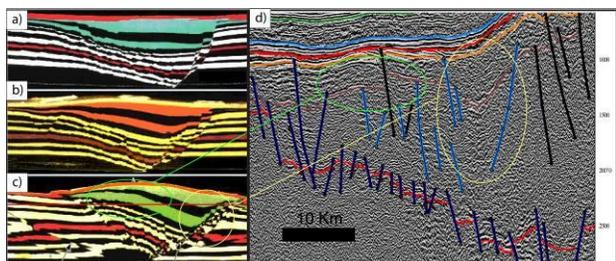


Figura 4: a) Modelo de Rifte de Schlische e Withjack (2007) *apud* Hercos et al. b) Modelo de rifte com inversão incipiente c) Modelo de Rifte com forte inversão d) Zoom sobre linha sísmica da porção leste mostrando forte associação com o modelo de inversão.

O mapa de espessura sísmica (Figura 3) mostra que a formação dessa sequência foi intimamente controlada pela arquitetura do embasamento. As regiões do Alto de Sete Lagoas e do Alto de Pirapora inicialmente limitaram a deposição atuando como margem flexural do rifte, sendo posteriormente cobertos parcialmente e totalmente, respectivamente, pela sequência marinha (flexural), evidenciado pela quietude dos estratos dessa sequência nas linhas sísmicas. Essa sequência tem pleno desenvolvimento na região leste, onde provavelmente houve a maior abertura. Através do mapa geológico e do mapa estrutural do topo da sequência 1, foi determinada uma possível falha de borda do rifte (linha verde na figura 3), tendo em vista que devido os processos orogênicos da Faixa Araçuai provavelmente ela foi invertida. No segmento oeste as falhas normais preexistentes foram aproveitadas e invertidas devido ao evento compressivo Brasileiro.

### Sequência Depositional 2

A SEQ-2 é uma sequência deposicional de primeira ordem subdividida em três sequências de segunda ordem: SEQ-2a, SEQ-2b e SEQ-2c onde o agrupamento em uma única sequência foi realizado com base em critérios morfológicos. Embora elas tenham uma morfologia diferenciada, isto é, com padrões de mudança de deposição e fácies sísmicas diferentes em uma variedade de linhas, é possível ver claramente uma geometria de cunha com tendência de espessamento para oeste semelhante (Figura 5) nas SEQ-2a, SEQ-2b e SEQ-2c havendo apenas variação em fácies sísmicas e em "espessura" em milissegundo entre essas unidades fruto da interação do espaço de acomodação e disponibilidade de sedimento além, do efeito tectônico erosivo na SEQ-2c na porção leste.

Essa sequência ocorre por toda a bacia, tendo uma tendência de cunha no segmento norte diferentemente do segmento sul onde ela se deposita sobre o embasamento que está estruturado em falhas normais. Nessa última região não é possível estabelecer sua divisão nas sequências de ordem menores, primeiro por não haver linhas sísmicas que conectem esse segmento com o norte, segundo por fatores geológicos, uma vez que as discordâncias e principalmente fácies utilizadas para defini-las não são reconhecidas.

Devido às características citadas e com base na correlação com geologia de superfície essa sequência é associ-

ada ao registro de Margem Passiva da bacia, chamada de sequência Canastra - Paranoá - Macaúbas. Essa associação é feita, pois essa sequência aflora no oeste (NW da Figura) na região do domo de cristalina, onde ocorrem os afloramentos do Grupo Canastra, e na região leste onde aflora o Grupo Macaúbas.

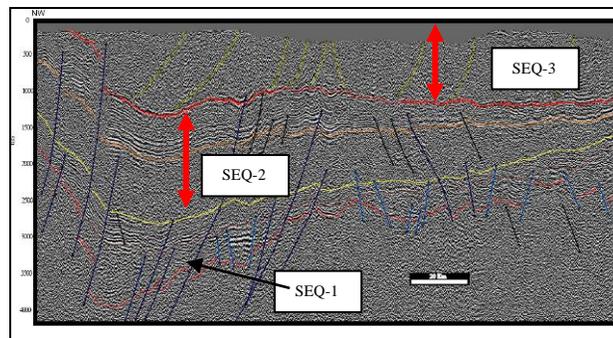


Figura 5: Linha Sísmica no oeste da Bacia, mostrando a tendência de cunha. Algumas falhas normais (azul escuro) foram invertidas durante o evento Brasileiro.

Os dados mostram que inicialmente a sedimentação dessa sequência ficou restringida a região oeste, sendo limitada pelos altos de Pirapora e de Sete Lagoas, que serviam como área fonte. Posteriormente devido a uma transgressão, a sedimentação cobriu os altos do embasamento e se expandiu pela área sul da bacia. Nessa sequência é possível mapear em duas linhas sísmicas um possível vale inciso, o qual é mais evidente com a aplicação dos atributos Amplitude RMS que destacou o contraste de impedância que existe nessa interface, e fase instantânea que ressaltou os onlaps.

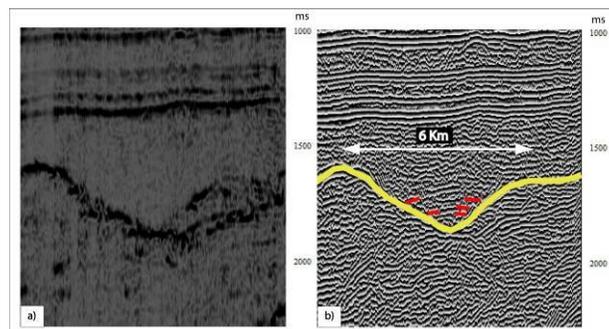


Figura 6: Zoom sobre linha sísmica da região oeste da área sul. a) Linha com atributo Amplitude RMS b) Linha com atributo Fase Instantânea.

Ao final da sedimentação predominou um ambiente mais plataformal, onde há alternância de sedimentação siliciclástica e carbonática, o qual marca a mudança de ambiente transgressivo anterior para um ambiente marinho raso. O que é suportado pela alternância de fácies sísmicas de alta amplitude e alta frequência, além dessa sequência ser exposta na região do domo de cristalina, onde foram descritos afloramentos com alternância de arenitos e carbonáticos de ambiente plataformal.

O mapa de espessura sísmica (Figura 7) dessa sequência mostra uma região de maior deposição à oeste, e um adelgaçamento na direção dos altos estruturais.

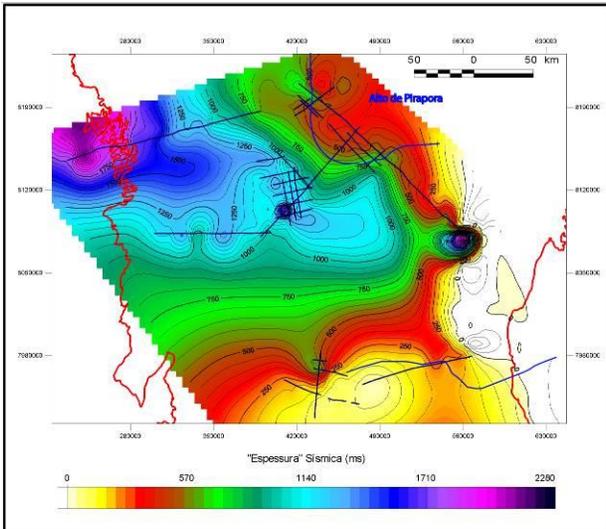


Figura 7: Mapa de espessura sísmica da Sequência 2 com os altos estruturais demarcados em azul.

A tectônica compressiva posterior a formação dessa sequência, que ocorreu no oeste da bacia, e que formou a faixa de dobramentos Brasília, afetou de forma significativa as falhas normais preexistentes que atingiam essa sequência. Elas foram rotacionadas e invertidas como pode ser visto na figura 5.

**Sequência Depositional 3**

A SEQ-3 é uma sequência deposicional de primeira ordem marcada na base pela discordância D5 bem evidente na sísmica e correlacionada nos poços com registro estratigráfico da sequência Bambuí que aflora amplamente na área sul da bacia. Teoricamente ela é limitada no topo pela discordância que a separa da seção Fanerozóica, porém em alguns poucos locais onde estão linhas sísmicas e a seção mais recente aflora, não são vistos nenhum indicativo de discordância, além disso, no topo do poço P1 ela aparece com uma espessura de 60 m, o que não é significativo para a sísmica já que a parte superior do dado pode ter sido cortada durante o processamento. A discordância D5 (em vermelho) é a mais evidente (Figura 8) e distribuída de toda a bacia, sendo possível ver os truncamentos erosivos claros em praticamente todas as linhas. No poço P1 essa discordância aparece a 1775 m entre uma camada inferior de diamictitos e uma superior de conglomerados.

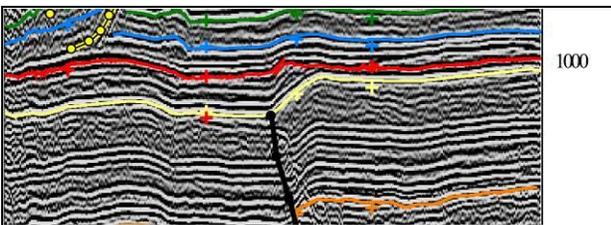


Figura 8: Zoom da linha mostrando claramente o caráter angular da discordância D4 (em vermelho).

A SEQ-3 mostra uma alternância de duas fácies sísmicas: refletores de alta amplitude e contínuos e refletores de baixa amplitude e descontínuos, sendo dividida em cinco seqüências de segunda ordem SEQ-3a a SEQ-3e

baseadas em elementos de fácies sísmicas e na correlação (Figura 9) com o poço P1 que mostra uma alternância de carbonatos e folhelhos siliciclásticos, sem conteúdo arenítico, com exceção de um nível superior associado a seção Fanerozóica. Essa associação é interpretada como o registro de um ambiente profundo onde se depositava folhelho marinho distal que devido às oscilações do nível de base, quando havia uma regressão a plataforma carbonática proximal prograda.

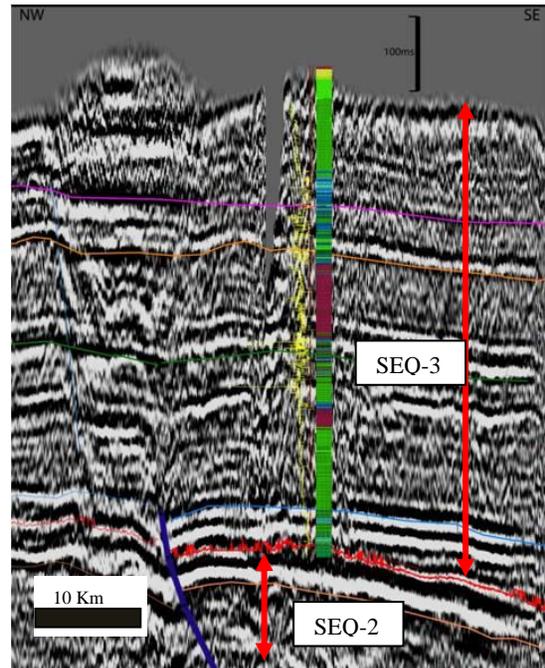


Figura 9: Correlação do poço P1 com a sísmica. Perfil sísmico em amarelo.

Nos segmentos norte e central a SEQ-3 está depositada sobre uma espessa camada das seqüências anteriores, diferentemente do segmento sul em que sua deposição se dá praticamente sobre o embasamento (Figura 10).

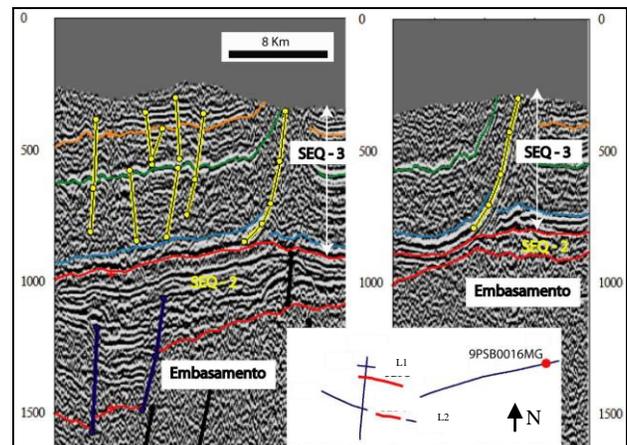


Figura 10: Linhas sísmicas strike separadas por 14 Km, L1 (esquerda) e L2 (direita) mostrando que a deposição da SEQ-2 adelga-se no sentido Norte - Sul, fazendo com que a SEQ-3 que possui a mesma "espessura sísmica" do segmento central praticamente deposite sobre o embasamento.

No segmento sul o embasamento funcionou como uma barreira na sedimentação para as sequências 1 e 2. Tal fato leva a acreditar que a sequência Bambuí compõe o registro de uma transgressão marinha que cobriu toda a área do cráton com ampla distribuição sobre a bacia, com uma lamina d'água pequena que propiciasse o desenvolvimento de carbonatos em uma fase de intracratônica.

O mapeamento da SEQ-3 mostrou que ela possui uma ampla distribuição pela área sul sendo inclusive mantida suas estruturação e "espessuras" em tempo conforme mapa da Figura 11. No segmento leste na região da Serra da Água Fria (assinalado por dois anticlinais) é possível ver o efeito da tectônica compressiva da Faixa Araçuai expor essa sequência a superfície sujeitando-a a erosão. Negligenciando essa região com efeito tectônico posterior, a parte mais delgada possui 800 ms e a parte mais espessa 1000 ms, e utilizando a velocidade intervalar de 5100 m/s calculada com base nos poços que atravessam essa sequência, tem-se espessuras entre 1785 e 2550 metros, o que não é uma variação muito grande do ponto de vista de bacia de grande escala, isto é 200 km, diferentemente do que seria esperado para uma bacia *foreland*. Esse dado corrobora com a idéia de que a mesma foi originada em mares epicontinentais em sequências intracratônicas.

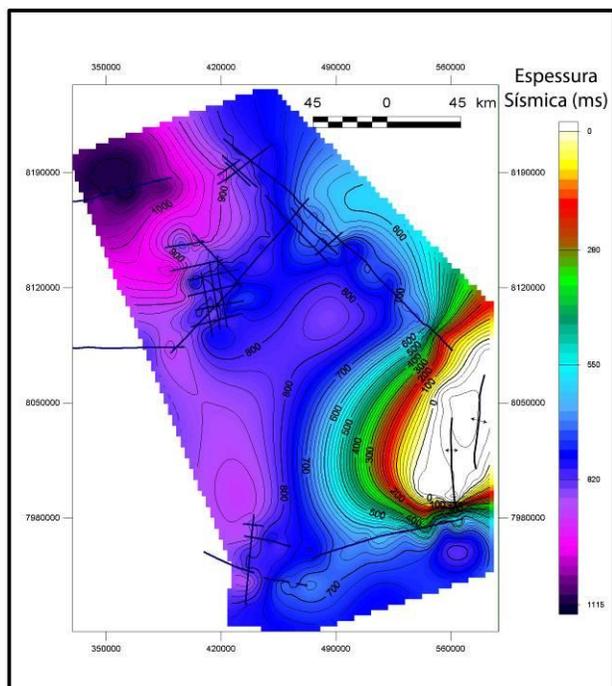


Figura 11: Mapa de Espessura Sísmica da SEQ-3 mostrando a distribuição uniforme por toda bacia. Notar que a região dos altos de Pirapora e Sete lagoas não exerceram nenhuma influência sobre a deposição da mesma, além da presença de dobras expondo-a na região da Faixa Araçuai (Serra da Água Fria).

Na região oeste essa sequência está afetada por uma série de Cavalgamentos epidérmicos (falhas amarelas) enraizados na discordância D4 que fizeram as sequências mais basais que a SEQ-3 eventualmente aflorarem. Essa deformação é claramente posterior, gerando leques imbricados e não havendo estratos sintectônicos (Figura

12). A tectônica do evento Brasileiro empurrou a sequência 3 sobre ela mesma, gerando uma zona de *thrust*, que pode ser observada no mapa geológico e nas linhas sísmicas (Figura 13). Nessa região delimitam-se a partir do oeste três domínios tectônicos distintos: O Domínio D1 onde ocorrem uma série de falhas reversas e cavalgamentos, e devido à deformação não é possível mapear refletores; o domínio D2, onde ocorrem falhas reversas e cavalgamentos que são associados com o mapa geológico em superfície; e o domínio D3 onde a deformação é incipiente próximo ao principal cavalgamento (que se estende por toda a área sul) e é atenuado à medida que tende para a região leste da bacia.

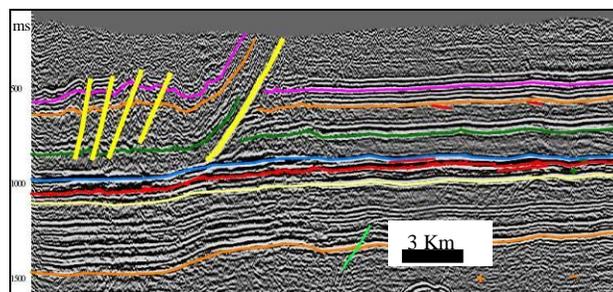


Figura 12: Leque imbricado formado sobre a sequência 3. A discordância D5 é utilizada como "detachment" dos cavalgamentos.

Essa observação juntamente com a análise de deformações associadas ao Evento Brasileiro, ausência de evidências de sintectonismo na deposição da mesma, ausência de padrão divergente de refletores no mapeamento sísmico, pouca variação de espessura mostrada pelo mapa de "espessura" sísmica e espessura calculada para as áreas mais espessas e delgadas levam a conclusão que a SEQ-3 ou sequência Bambuí foi gerada em ambiente intracratônico, que posteriormente foi afetado pelo Ciclo Brasileiro. Se algum registro estratigráfico corresponde ao desenvolvimento de um estágio de *foreland* este é a Formação Três Marias, que apresenta unicamente siliciclásticos com alta razão arenito/folhelho, fora do padrão dessa sequência e do modelo de mares epicontinentais, não aparecendo inclusive no poço P1.

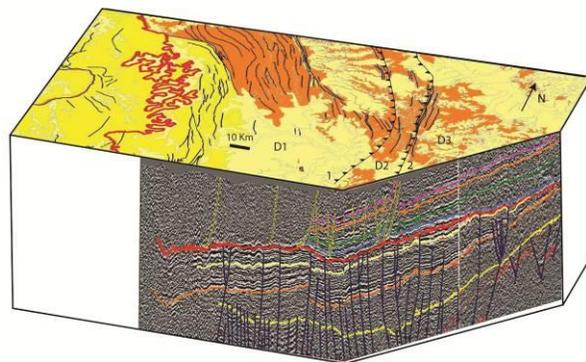


Figura 13: Bloco diagrama com o mapa geológico e duas linhas sísmicas referenciadas mostrando as correlações das estruturas e domínios estruturais observados na sísmica e no mapa geológico.

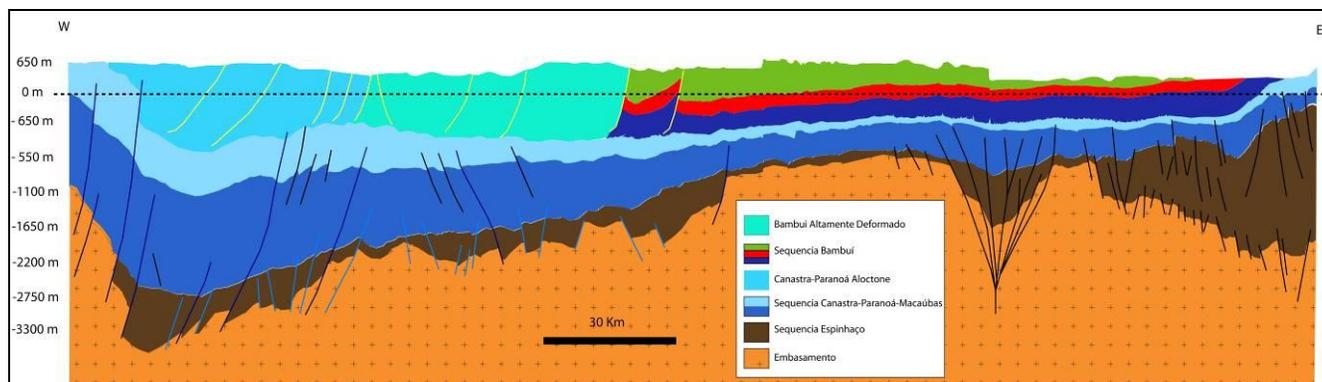


Figura 14: Seção Geológica esquemática da área sul.

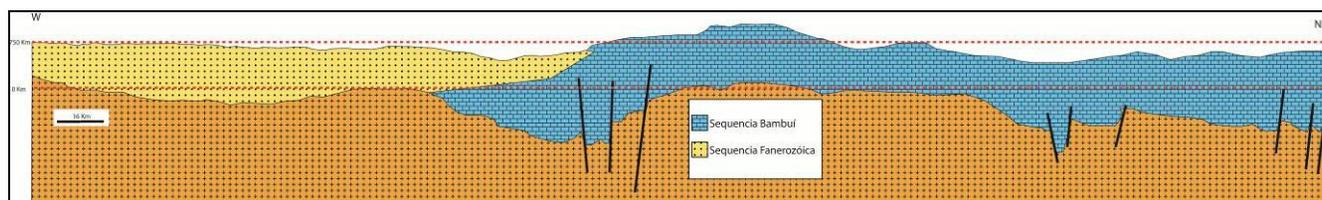


Figura 15: Seção Geológica esquemática da área norte

### Comparação Área Sul e Norte

As áreas sul e norte da Bacia do São Francisco apresentam arquiteturas deposicionais e estruturais distintas, como pode ser observado nas figuras 14 e 15.

Em termos estruturais, a área sul possui falhas reversas e cavalgamentos evidenciando uma tectônica compressiva relativa à compressão do Brasiliano, enquanto que na área norte não há evidências de efeitos compressivos associados a esse evento, apenas a presença de algumas falhas normais que formam *grabens* localizados.

Na Área Sul, a Bacia do São Francisco possui pelo menos três seqüências de primeira ordem, sendo estas, Espinhaço, Canastra-Paranoá-Macaúbas e Bambuí, mapeadas na sísmica, nos poços e em afloramentos, e embora presente em afloramentos, a Sequência Fanerozoica (predominantemente representada pelos arenitos eólicos da Formação Urucuiá) não aparece de forma significativa nos poços, além de não ser identificado na sísmica. Enquanto que na área norte a principal sedimentação é a da Sequência Fanerozoica (Formação Urucuiá), o qual se deposita diretamente sobre o embasamento cristalino, na região oeste, sendo gradativamente substituída pelos carbonatos do Bambuí na direção leste (Figura 15).

Enquanto que na área norte a profundidade máxima do embasamento, estimada com base nas linhas sísmicas chega a 1400 m de profundidade, na porção mineira chega-se à espessuras maiores que 4000m de profundidade por grandes extensões.

### Conclusões

A integração de dados sísmicos, de poços, gravimétricos, mapa geológico e afloramentos realizado nesse estudo, mostrou que a Bacia do São Francisco apresenta diferentes seqüências com arquiteturas deposicionais distintas,

as quais estão associadas com diferentes fases tectônicas.

A análise mostrou que a Bacia do São Francisco não pode ser caracterizada como uma intracratônica clássica, tal como as bacias paleozoicas, mas sim uma bacia localizada sobre um craton que durante sua evolução passou por estágios tectônicos que geraram seqüências de primeira ordem que foram empilhadas. Os dados sísmicos sugerem que a Sequência 3, ou Sequência Bambuí não foi formada em regime tectônico de *foreland*, uma vez que a deformação vista em sísmica é claramente posterior e não existem padrões divergentes de refletores.

A área sul apresenta características estratigráficas e estruturais muito diferentes da área norte, o que ocorre devido ao diacronismo na evolução entre ambas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional do Petróleo pelo financiamento do Projeto BAFRAN, o qual possibilitou a realização desse trabalho.

### Referências

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINSNETO, M. A. (Ed.). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2001. p. 9-30.

HERCOS C.M.; MARTINS-NETO, M. A.; DANDERFER, A.F 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície. Revista Brasileira de Geociências, 38 (2 -suplemento): 197-212.