3 Analise de dados

Este capítulo tem por finalidade descrever a área de estudo, analisar os dados de perfuração e de perfis, avaliar as escolhas dos parâmetros na calibração dos modelos de obtenção de pressão de poros e verificar a utilização dos mesmos parâmetros e tendências para uma determinada área. Apresentar ainda um modelo tridimensional gerado a pertir de propriedades utilizadas para construção de cubo de pressão de poros.

Como ferramenta de cálculo e estudo das pressões de poros o software da companhia Knowledge Systems©, Predict® foi utilizado. A base de dados utilizada foi fornecida pela companhia Petrobras. Todos os poços apresentam lâminas d´água profundas de aproximadamente 1800 m de profundidade.

Como ferramenta de modelagem e visualização tridimensional de propriedades o software da companhia Schlumberger©, Petrel® foi utilizado.

O estudo tem como finalidade a realização de retro-análises de poços de correlação já perfurados para a obtenção de uma tendência de compactação normal comum a todos os poços de um mesmo campo e a construção de cubos de propriedades utilizando modelos geostatísticos que serão definidos neste Capítulo.

A curva de pressão de poros é calibrada através dos dados de pressão medidos nos reservatórios, dos dados de peso de fluido de perfuração, verificação dos arrombamentos do perfil caliper possivelmente ocasionado por uma pressão maior que o peso de fluido utilizado, a leitura dos boletins diários de perfuração para a verificação de problemas nos poços.

Para a obtenção dos dados, como primeira etapa do desenvolvimento desta dissertação, foi feito um extensivo trabalho de busca de dados necessário para as análises. Após aquisição, a qualidade dos mesmos foi verificada.

As buscas foram feitas nos bancos de dados da Petrobras de onde foram utilizadas diversas fontes de buscas. O processo de verificação de qualidade também inclui a verificação de coerência dos dados de um banco de dado para outro. O trabalho também incluiu contato com os profissionais envolvidos na perfuração dos poços e com geólogos da região.

Os dados adquiridos contemplam dados de perfis, dados de perfuração, localização e trajetória dos poços, dados dos projetos, dados de execução de projeto, topos de horizontes geológicos, dados de pressão de formação, testes de absorção, boletins de perfuração (para verificação de indícios de pressões anormais), relatórios ANP (Agência Nacional de Petróleo), interpretações sísmicas e geológicas entre outros.

O trabalho de leitura dos boletins de perfuração também consiste na busca de indícios de prisão de coluna, torque e *drags* elevados, *kicks*, perdas de circulação, ganho de pressão, testes de absorção, além de problemas ocorridos durante a perfuração. Nos boletins diários também são obtidos os pesos de fluido de perfuração utilizado para auxiliar na calibração das curvas tendência normal de compactação.

A etapa de leitura dos dados de poços consiste em obter as profundidades de lâmina d'água, profundidade final dos poços, objetivos, dados localização, datas das perfurações, profundidades das formações, profundidades dos topos e bases dos horizontes, idades geológicas das formações e suas profundidades, litologias constatadas, existência ou não de amostras de rochas, temperatura do poço e principalmente onde são encontrados os dados de testes de pressão, quando realizados, nos poços.

Foram escolhidos quatro poços do campo analisado para a realização a calibração de uma curva única de compactação para o mesmo campo. Após análise foi incluído no modelo tridimensional construído para a construção do cubo de pressão de poros.

O modelo foi construído baseado somente em dados de poços. Foram utilizados os resultados das interpretações fornecidas em formato de figura pelos geólogos apenas para fins de verificação do modelo criado. Devido a políticas de confidencialidade de dados da companhia Petrobras© não foi possível inserir no modelo dados de sísmicas de poços, interpretações de falhas geológicas e dos topos dos reservatórios.

3.1. Descrição dos poços

3.1.1.Poços utilizados no modelo unidimensional (Poços de calibração)

Os poços contemplam dados de litologia interpretada, apresentados na primeira coluna. O modelo utilizado para apresentar as diversas litologias segue os padrões Petrobras©. A Figura 3.1 apresenta uma legenda dos padrões de litologias apresentados nos poços estudados.



Os poços apresentam registros de caliper que são utilizados para a verificação dos diâmetros dos poços perfurados e análise do arrombamento do poço, portanto, auxiliam na verificação de ocorrência ou não de pressões anormais nos poços. Os perfis de caliper são denominados "Caliper", são apresentados nas cores pretas e tem como unidade polegadas (in). São apresentados no primeiro gráfico de cada poço.

Os poços apresentam registros de Raios Gama, para identificação das litologias e principalmente a identificação das camadas de folhelho. Os perfis de Raios γ (Gamma) foram denominados de "GR" sua unidade é o GAPI (unidade de radioatividade) e são apresentados pela cor azul na primeira janela de visualização. São apresentados no segundo gráfico de cada poço.

Os poços apresentam registros de densidade, porém, em geral, os registros de densidade não são obtidos na profundidade inteira do poço, e são essenciais para a obtenção do gradiente de sobrecarga. Então é aplicado o método de Miller para os primeiros metros de poço e posteriormente composto com a curva registrada para a obtenção de um perfil de densidade completo. O registro estimado para todo o poço recebe o nome de "RHOB", é apresentado na cor rosa e tem como unidade g/cm³. Estes são apresentados no terceiro gráfico de cada poço.

Os poços também possuem registros sônicos, os perfis usados para estimar porosidade, que são utilizados para a aplicação dos métodos de Bowers e Eaton. Neles são verificadas as tendências de compactação. No método são utilizados dados sônicos somente dos folhelhos. Os dados são filtrados conforme a interpretação faciológica da geologia e nos poços onde não há essa informação, o critério utilizado é baseado em dados de Raios Gamma. Os registros sônicos recebem o nome de "DT", são apresentados nas cores azuis e tem como unidade o ms/ft (unidade de tempo intervalar: milissegundos por pé).

Os dados de pré testes e testes de formação são utilizados para calibração das curvas de pressão de poros. Os dados de medida recebem o nome de "TFC" são apresentados com símbolos na cor verde e unidade ppg (unidade de gradiente de pressão: libras por galão).

Foram utilizados os poços DB-3, DB-4 e DB-5 e DB-11 para a calibração das curvas do modelo. Estes poços foram perfurados na fase de exploração do campo. Portanto, os dados de medida de pressão no reservatório correspondem à pressão original da formação. Os poços possuem boa correlação entre si por apresentarem as mesmas formações e estarem em uma mesma bacia. Estes poços ainda apresentaram melhores qualidades dos dados de poços. Em análises unidimensionais geralmente são utilizados um ou dois poços de correlação para estudos, então a escolha de quatro poços de correlação para calibração de uma curva é possível para o entendimento do comportamento de compactação da bacia, principalmente uma bacia relaxada e não apresentar nenhum compartimento de pressão.

Em todos os poços utilizados neste trabalho para calibração de curva de compactação existiam dados de litologia interpretados. Eles são apresentados na primeira coluna. A esquerda dos perfis.

A base de dados utilizada para as retro-análises esta mostrada nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

O poço DB-3 apresentado na Figura 3.2 é um poço vertical e possui lâmina d água de aproximadamente 1800 m e profundidade final de 4270 m. Na leitura do boletim de perfuração não foram constatados ocorrências de problemas de estabilidade ou de alta pressão de poros.

Observam-se na Figura 3.1 que o poço apresenta no perfil caliper pequenos arrombamentos nos arenitos. E pequenas espessuras de arenito, o poço possui uma quantidade significativa de rochas do tipo folhelho que são as rochas utilizadas nos modelos de estimativa de pressão de poros.



Figura 3.2 – Dados de poço DB-3.

O poço DB-4 apresentado na Figura 3.3 é um poço vertical possui lâmina d água de aproximadamente 1880m e profundidade final de 2900m. Na leitura do boletim de perfuração não foram constatados problemas de estabilidade ou de pressões anormais.

O poço DB-5 apresentado na Figura 3.4 é vertical com lâmina d água de aproximadamente 1880m e profundidade final de 3020m.



Observam-se na Figura 3.4 que o poço apresenta espessuras de rocha tipo arenito maiores que o os poços apresentados nas figuras anteriores. O perfil caliper apresenta arrombamentos nestas localidades, podendo interferir nos valores de densidade e sônico. Porém nos boletins diários não foi encontrado o relato de nenhum evento de problemas de instabilidade.



O poço DB-11 apresentado na figura 3.5 é vertical possui lâmina d água de aproximadamente 1880m e profundidade final de 2960m.



3.1.2. Poços utilizados no modelo tridimensional

No modelo tridimensional foram carregados dados de cinqüenta e seis poços na região. Os dados contemplam em perfis de caliper, Raios Gamma, densidade, sônico, litologia, sobrecarga e dados de interpretação geológicas das litologias, estratigrafias e cronoestratigrafia realizadas pelos geólogos da Petrobras©.



Os poços se encontram com a seguinte disposição apresentada na Figura

Figura 3.6 – Mapa de localização dos poços.

3.1.3.Dados de entrada

A primeira etapa da construção do modelo foi carregá-lo com os poços da região e seus dados. Foram inseridos: dados de lâmina d água, localização

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621514/CA

3.6:

geográfica, mesa rotativa, trajetória, topos estratigráficos. Com esses dados foi possível construir as superfícies do modelo e posteriormente os horizontes.

Os horizontes têm por finalidade limitar zonas (ou formações, ou pacotes estratigráficos) onde a teoria das variáveis regionalizadas, de Matheron, seja aplicável, ou seja, zonas onde exista correlação espacial entre as variáveis estudadas.

A Figura 3.7 apresenta os poços carregados no modelo dispostos espacialmente. Pode se visualizar a disposição dos poços e suas trajetórias.



Figura 3.7 – Poços carregados no modelo e suas trajetórias.

3.1.4. Modelagem geométrica

3.1.4.1. Geração de horizontes e construção da Malha (Grid)

Os dados de entrada utilizados para a geração dos horizontes geológicos e superfícies foram os dados de topo de formação obtidos no banco de dados nos dados de poços. A escolha da utilização dos dados de topos para a construção de horizontes se deve ao fato de serem dados constatados pela equipe de geologia, portanto, referem-se à profundidade real das formações.

Os dados de entrada de topo dos horizontes estratigráficos seguiram as seguinte características apresentada na Tabela 3.1.

Poço	Superficie	MD	Poço	Superficie	MD
3	Mioceno	1929	397	Peleoceno	2907
3	Oligoceno Inferior	2814	445	Mioceno	2421
3	Eoceno Superior	2937	445	Oligoceno Inferior	2817
3	Eoceno Medio	2947	445	Oligoceno Superior	2817
3	Peleoceno	2991	445	Eoceno Medio	2889
3	Maastriciano	3171	445	Peleoceno	2997
4	Mioceno	1908	447	Oligoceno Inferior	2943
4	Oligoceno Superior	2691	447	Eoceno Superior	2988
4	Eoceno Superior	2790	615	Oligoceno Superior	2597
4	Eoceno Medio	2799	15D	Oligoceno Superior	2980
4	Peleoceno	2808	15D	Oligoceno Inferior	2999
5	Mioceno	2478	19D	Mioceno	2580
5	Oligoceno Superior	2757	1DA	Mioceno	2349
11	Mioceno	2504	1DA	Oligoceno Superior	2859
11	Oligoceno Superior	2784	1DA	Oligoceno Inferior	2889
11	Oligoceno Inferior	2856	1DA	Eoceno Superior	3000
11	Eoceno Superior	2955	1DA	Eoceno Medio	3036
12	Oligoceno Superior	2795	1DA	Peleoceno	3117
12	Oligoceno Inferior	2843	1DA	Maastriciano	3225
12	Eoceno Superior	2885	1DA	Coniaciano	3387
13	Oligoceno Inferior	2781	26DP	Oligoceno Inferior	2994
25	Mioceno	2455	2D	Mioceno	2349
25	Oligoceno Superior	2760	2D	Oligoceno Superior	2952
25	Oligoceno Inferior	2800	2D	Oligoceno Inferior	2961
359	Mioceno	1998	2D	Eoceno Superior	3033
359	Oligoceno Superior	2775	2D	Eoceno Medio	3069
359	Eoceno Superior	2829	2D	Peleoceno	3123
359	Eoceno Medio	2850	33D	Oligoceno Superior	2952
397	Mioceno	2007	7D	Oligoceno Superior	2985
397	Mioceno	2007	9DA	Mioceno	2601
397	Oligoceno Superior	2727	9DA	Oligoceno Superior	2889
397	Eoceno Medio	2835			

Tabela 3.1 – Dados de topos estratigráficos.

Para a construção de horizontes foi utilizado o algoritmo de curvatura mínima para interpolação entre marcos estratigráfico. Os horizontes ao serem modelados, são automaticamente inseridos na malha. A etapa de geração de horizontes é a primeira etapa de construção da malha que será utilizado para a população de propriedades no modelo.

Este algoritmo está dividido em dois passos: interpolação local e extrapolação global. Na interpolação local foi inserido o raio de influência local dos dados de pontos e algoritmos de interpolação local utilizados.

O raio de influência escolhido foi de uma célula, como sugestão do software Petrel® como melhor opção para baixa densidade de pontos. O algoritmo de interpolação local utilizado foi o de média móvel. O algoritmo calcula a média de pontos próximos ao nó da malha e trabalha melhor com poucos dados ou dados de baixa qualidade.

O algoritmo de extrapolação global utilizado foi o de curvatura mínima (Método de Euler, seguindo uma tendência) que consiste em extrapolar valores que não podem ser avaliados na interpolação local. Esse método utiliza um operador de aplainamento que permite que a superfície se mantenha plana (amaciada).

A Figura 3.8 apresenta o processo de geração de horizontes.

😂 Ma	ake h	orizons wi	th 'Cop	y (2) of M	odelo de pre	essoes/3D	grid'					X
Horiz	zons	Settings	Faults	Segments	Wells 🔯	Uncertainty	Info					
				-								I I S
Son	ne hint	s for the table	Horizo	n type:	Conform to:	🕜 Use h	orizon-fault lir	nes: 🔝 Ir	nput: 🔝			
Inc	dex	Horizon name	Color	Calculate	Horizon type	Conform (hor	o another izon	Status	Smooth iterations	Use horizon -fault	Well tops	Input #1
1	823)	TW.	~	Ver Ver	Conformable	No	1	- Done	0	lines		
2	2	Topo Poco	~	Yes	Conformable	No	1	V Done	0	Yes		
3	2	Oligoceno	~	Yes	Conformable	No	1	✓ Done	0	Yes	I Cligocen	Dligocen
4	2	Eoceno Me	~	Ves Yes	Conformable	No	1	🗸 Done	0	Ves Yes	🔿 🕼 Eoceno	Eoceno
5	2	Peleoceno	~	Yes Yes	Conformable	No	1	🗸 Done	0	Ves Yes	Peleocen	🔿 🛷 Peleocen
6		Maastrician	~	Ves Yes	Erosional	No	1	V Done	0	✓ Yes	🔿 🛷 Maastrici	🔿 🐼 Maastrici
7	2	Coniaciano	~	🗹 Yes	Conformable	No	1	🖌 Done	0	Yes Yes	🔄 🛷 Coniacia	🔿 🛷 Coniacia
-											✓ <u>0</u> K	🔀 Cancel
			a Mal	ke horizor	s with 'Copy	of Modela	o de press	oes/3D gr	id'			
			Horizo	ons Setting	s Faults	Segments	Wells	Uncertain	y Info			
			Fill in g	gaps in undef	ined area and to	owards faults						
				J Method	Convergen	t gridder						
			Other	settings	Minimum ci	urvature						
			If inp @ @ \$	out data is a s Locked Force H Collaps	urface: 🥝 📀 I horizon nodes norizons to be ca e the zones to z	Use the surfa influence rad alculated for a ero thicknes:	ace directly ius: 2 all segments s if diff. is less	icells] [than:	vert to points			
			Ħ	a 🗹 Allow ir	nput data below	or above the	skeleton grid	1	?			
			2	lconize	all points used	(points outsid	e the fault inf	luence)				
			Fault r	Matels (m the fault mod							
			3	Lock a	nts by: 💿 By II Il resampled hori	zon nodes) Byname	ite fault mate	ching log			
			Experi	t settings for r Tempo	ninimum curvatu rary pre-smoothi owed difference	ire ng, number o in Z-values:	f iterations:	1 🗸	?			
				Local influ	ence radius:	1 Cell		~	?			
				Local meth	od:	Average of	points	*	?			
				Local poin	t weighting:	Equal		*	?			
			2	Extrapolati	on method:	Minimum cu	irvature	~	Minim Curve	hum ture		
				Extrapolati	on to faults:	No special I	reatment (De	efault) 💌	settin	<u>]s</u>		
							2		<u>✓ 0</u> K	(× 0	Cancel	

Figura 3.8 - Construção de horizontes.



Os seguintes horizontes apresentados na Figura 3.9 foram gerados.

Figura 3.9 - Vista dos horizontes gerados.

A escolha das formações erosionais foi possível através da percepção que certos horizontes não se apresentavam em todos os poços e por possuírem características erosionais.

Os horizontes criados foram o topo do Mioceno (fundo do mar), topo do Oligoceno, topo do Eoceno, topo do Paleoceno, topo do Maastriciano e topo do Coniaciano.

Durante a criação dos horizontes, nas regiões entre os mesmos são geradas as zonas. A primeira zona, limitada pelo horizonte Mioceno e Oligoceno corresponde à formação abaixo do fundo do mar, composta basicamente por siltitos e arenitos. O siltito nesta formação caracteriza-se por coloração castanha avermelhado. E o arenito observado são hialitos, de granulometria fina a grossa, composição quartzosa, subangulares, com seleção regular e desagregada. Apresentam coloração cinza claro, com cimento calcífero e compacto.

A segunda formação que está limitada pelos horizontes Oligoceno e Eoceno e é composta por arenitos, siltitos e folhelhos. Os arenitos observados são hialitos, de granulometria fina também variando de médio a grosso, composição quartzosa, subangulares, seleção regular e desagregada. Alguns grãos apresentam coloração cinza claro, com cimento calcifero, semifriável e porosidade fechada. O siltito é castanho avermelhado, localmente cinza claro de coesão semidura. Os folhelhos variam de coloração cinza escuro a claro, localmente cinza esverdeado, micáceo, piritoso, siltoso e levemente carbonático, com coesão semi-dura.

A formação, de idade Eoceno, entre os horizontes Paleoceno e Eoceno é composta basicamente por folhelhos, com coloração variando de cinza escuro a cinza claro, localmente cinza acastanhado, micáceo, siltoso e levemente carbonático. A partir do horizonte Paleoceno é possível encontrar a mesma formação, porém com membros distintos, de idade Maastriciano, constituídos por folhelhos e arenitos. O arenito encontrado neste membro é hialino, com granulometria variando de muito fina a fina, subanguloso a subangular, seleção boa, quartzoso e desagregado. Localmente ocorrem arenitos de coloração cinza esbranquiçado, muito fino, com cimento calcífero e com coesão semi-friável. No horizonte abaixo do Coniaciano encontra-se uma nova formação caracterizada pela presença de folhelhos, margas, arenitos e calcissiltitos. Os folhelhos apresentam-se com uma coloração que varia de cinza escuro a cinza claro, localmente cinza acastanhado, micáceo, siltoso, localmente piritoso e levemente carbonático. A coesão é semi-dura.

As zonas são posteriormente dividas em camadas. Essa divisão consiste na discretização dos elementos que formam a malha. Quanto mais discretizado melhor será a modelagem. O critério de divisão escolhido foi de dividir em camadas proporcionais, com tamanhos de células definidos. Foi então escolhido a altura de 5 m por cada célula.

A Figura 3.10 apresenta a janela de divisão de camadas e o critério adotado para a divisão dos horizontes de camadas.

O critério de escolha da altura é baseado na quantidade de dados. Os perfis obtidos foram exportados com resolução de 0,5 m e utilizando uma célula de 5 m é possível fazer a média de 10 valores para preencher a célula. O que é considerável razoável para os métodos estatísticos. O grid (malha) gerado é apresentado na Figura 3.11.

Após definidos os horizontes foi possível gerar sessões geológicas onde é possível visualizar a sessão onde os poços se encontram. O cenário geológico da região pode então ser exemplificado com o aspecto apresentado na Figura 3.12.

cess for makir	ng the lay	ering for eac	h zone							
Common sett	tings					-				
Build along:	Along	the pillars	~	Horizons	with steep	o slopes 🔣	S (partial			
🥰 🗹 Use	minimum	cell thicknes	:s: 5	[💽 🗹 Include p	proportiona	al/fractions, start	from: Top	× ?		
Settings for e	each zone	e								
Zone div	vision: 📘	📶 Refe	erence surface	: 🔽 🕴 Restore e	roded:	Restore b	base: 🚺			
Name	Color	Calculate	:	Zone division		Reference surface	Restore eroded	Restore base	Status	
Zone 1	~	Ves Ves	Follow base	Cell thickness:	5.00	Image: A start of the start	Yes	Yes	✓ Done	
Zone 2	~	Ves Yes	Follow base	Cell thickness:	5.00		Yes 🗌	Yes	✓ Done	
Zone 3	~	✓ Yes	Follow base	Cell thickness:	5.00		Yes 🗌	Yes 🗌	V Done	
Zone 4	~	Ves Yes	Follow base	Cell thickness:	5.00		Yes 🗌	Yes	✓ Done	
Zone 5	~	Ves Yes	Follow base	Cell thickness:	5.00	B)	Yes	Yes	V Done	



Figura 3.11 - Grid gerado.



Figura 3.12 – Seção geológica construída.



Figura 3.13 – Corte transversal da seção apresentada na figura 3.12.

O corte representado na figura tridimensional é o mesmo corte demonstrado na Figura 3.12. Na mesma figura foram representadas as litologias dos poços DB-4 e DB-11, para demonstração. Os topos das formações Oligoceno e Paleoceno obtidas nos poços também estão demonstradas nas figuras.

A zona Mioceno é a zona azul da figura. A zona Oligoceno é a zona em verde, a zona representada em amarelo é a zona Paleoceno e posteriormente às Maastriciano em laranja e Coniaciano em rosa.

A formação Mioceno pertence ao período Neogene e compreende as idades entre 5,3 a 23 milhões de anos. Compreende um a período de processo deposicional considerado como rápidos onde cada estágio apresenta durações com cerca de 2 a 4 milhões de anos. As formações Oligoceno, Eoceno e Paleoceno compreendem o período Paleogene, as formações possuem compreendem as idades de 23 a 34 ma, 24 a 56 ma e 56 a 66 ma, respectivamente. As formações Maastriciano e Coniaciano compreendem ao período geológico Cretáceo da época Cretáceo Superior. Suas idades compreendem de 66 ma a 70 ma e 85 ma a 90 ma respectivamente. Nos poços dessa região não foram constatados topos das formações Campaniano e Santoniano, que compreendem a esse intervalo de tempo. As informações referentes às formações e suas respectivas idades são encontradas na comissão Internacional de estratigrafia.

3.1.5.Modelagem de propriedades

Após a construção do esqueleto do modelo, inserção dos horizontes e definição do tamanho do grid, é possível carregar o modelo com os respectivos dados de perfis e construir assim os cubos de propriedades.

A primeira etapa consiste em uma análise estatística inicial da distribuição dos dados. Esta análise em conjunto com a visualização espacial das variáveis é denominada análise exploratória.

Na análise exploratória (*Exploratory data analysis* – EDA) são observadas informações como amplitude de, medidas de variabilidade (variância e desvio padrão) e medidas de forma. Desta análise é possível adquirir um conhecimento prévio do comportamento de cada variável, bem como a existência de *outliers* nos dados.

A verificação é feita de cada perfil carregado no modelo. Como exemplo é possível observar o histograma da Figura 3.14 de dados de perfis sônicos. Observa-se que os dados apresentam um comportamento de curva de distribuição normal.



Figura 3.14 – Histograma de distribuição dos dados de perfis sônicos

Em seguida os dados são inseridos no modelo através da técnica de escalonamento (*upscaling*). A Figura 3.15 apresenta o processo de escalonamento. Onde a célula recebe um valor médio (considerado representativo) dos valores da propriedade no trecho abrangido pela célula. No exemplo do perfil sônico cada célula onde o trajeto do poço percorre é carregado um valor referente à mediana dos valores no intervalo, que nos células do trabalho correspondem a 5 m.

Este primeiro passo de transferência dos valores dos dados para as respectivas células, para que possa fazer parte do modelo é denominado com o termo inglês de *upscaling*.

Após cada procedimento de carregamento de dados deve ser feita a verificação da distribuição dos mesmos no grid. Para isso é obtido um histograma que mostra os valores de perfis comparados aos valores escalonados como na Figura 3.16.

🗖 🦳 Create neu	propertu	Show result in well section
	. property	A+ DT 01
🖽 🎯 Update exi	sting property	rwrite O Replace and add new
Select Se	Well logs Welltop attrit Point attribut	butes tes
	Select	Δt, DT
Upscaled from: N Scale up settings Average method:	one Median	Wells Wells 1D 1DA 2D 3
	As lines	
Treat log:		
Treat log: Method:	Neighbor c	cell 💟 🔁 🕂 🕌 6H

Figura 3.15 – Processo de carregamento de dados na malha (*upscaling*).



Figura 3.16 – Histograma de dados sónicos carregados no modelo comparado aos dados de perfis

O programa também permite verificar a cada zona como o processo de escalonamento foi distribuído. Portanto pode-se verificar se os dados estão coerentes com os valores de perfis. No caso da Figura 3.16, nota-se que o comportamento geral da distribuição é mantido após o *upscaling*.

O mesmo procedimento é realizado para todas as propriedades que são inseridas no modelo. Neste trabalho os dados utilizados foram os perfis de Raios Gama, Densidade e Sônico.

Na Figura 3.17 a escala de cores representa os valores de densidade em cada célula da malha. Pode-se também visualizar o tamanho das células escolhido para o problema. Devido ao fato dos dados possuírem maior variabilidade na dimensão vertical a malha foi ajustada para pequenas alturas de células. Atentando-se para a possibilidade de ocorrência do efeito de conhecido como *support effect* o tamanho de malha foi considerado em função da grande distância dos poços. A área transversal da célula é considerada grande de dimensões quadradas de 300 x 300 m, porém não se constatou o *support effect* nos resultados. Este efeito é apresentado em Amstrong (1998).



Figura 3.17 - Dados de densidade carregados nas células do modelo.

3.1.6.Geostatística

3.1.6.1.Conceitos Básicos de Geostatística

A variabilidade espacial de propriedades geomecânicas são preocupações antigas de diversos pesquisadores. Desde o século 20 estudos vem sendo realizados por diversos pesquisadores sobre a variabilidade do solo. Inicialmente, buscavam-se somente correlações estatísticas que não indicavam a dependência espacial. Essa presença requer o uso da Geostatística, que surgiu quando Krige (1951) trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias se não levasse em conta as distâncias ente amostras. Matheron (1963, 1971) baseado nestas observações desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas. Matheron (1963) define a variável regionalizada como uma função espacial numérica que varia de um local para outro, que pode ser estimada através do semivariograma.

O semivriograma pode ser estimado pela equação 3.1.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$
(equação
3.1)

Onde N(h) é o número de pares de valores medidos, $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h.

O gráfico do semivariograma em função de h, quando é idêntico para qualquer direção de h é chamado de isotrópico e representa uma situação mais simples do que quando é anisotrópico. A Figura 3.18 apresenta o exemplo de um semivariograma, onde Co é o efeito pepita, que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a distância entre amostras, a medida que h aumenta $\gamma(h)$ também aumenta, até atingir o seu Patamar (C) que é o valor máximo onde o semivariograma se estabiliza. E a distancia onde $\gamma(h)$ atinge esse patamar é chamado Alcance (a).

Com a definição dos semivariogramas é possível estimar valores onde não há dados amostrados, o método de interporlação utilizado neste caso é a krigagem ordinária.



Figura 3.18 – Exemplo de semivariograma.

A krigagem ordinária é um estimador linear não tendencioso, pois busca obter uma média de residuos de erros igual a zero, ou seja, ele minimiza a variância dos erros das estimativas.

A estimativa do valor Z em um ponto x_0 é dada pela equação 3.2 nos n valores amostrados, adicionado ao parâmetro λ_0 .

$$Z_{x0}^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$
 (equação 3.2)

Para que não exista tendência nas estimativas a seguinte restrição (equação 3.3) deve ser atendida.

$$E[Z_{X0} - Z_{X0}^*] = 0$$
 (equação 3.3)

Substituindo a equação 3.2 na equação 3.3 obtem-se a equação 3.4.

$$m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i m$$
 (equação 3.4)

Para a equação ser atendida os seguintes critérios (equação 3.5) são adotados na krigagem ordinária.

$$\lambda_0 = 0 \ \mathrm{e} \ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$
 (equação 3.5)

Finalmente, as hipóteses de não tendenciosidade local é atendida e a soma dos pesos local é igual a 1.

Os variogramas obtidos e as krigagens realizadas são apresentadas nos itens a seguir.

3.1.6.2. Modelagem Geostatística

Com os dados carregados no grid inicia-se o processo da análise Geostatística dos dados, por meio da análise estrutural, onde a correlação espacial é estudada por meio de semivariogramas ou de covariogramas.

Como primeira etapa de análise é possível gerar um mapa do variograma dessa distribuição. São construídos mapas de variogramas para cada propriedade, de forma a estudar a correlação espacial entre os dados (amostras), ou seja, dar início à análise estrutural. Detalhes nas referências Isaacks, Armstrong, Chiles. A busca de pares é realizada em etapas iterativas, para cada incremento do vetor h, os *lags*, obedecendo as tolerâncias angulares e de comprimento. A Figura 3.19 apresenta os parâmetros de cálculo de semivariograma a partir de amostras irrergularmente espaçadas.

Segundo Faria (1997) a criação de mapas de contorno (isolinhas), e o delinhamento de espaçamento e disposição ótima de amostras do campo são aplicações imediatas.

Os processos de obtenção do melhor mapa são iterativos. São testados diversos valores de raios de busca e tamanho de *lag*. São obtidos diversos mapas com características semelhantes. Porém as variâncias podem ser maiores ou menores devido à segregação das amostras. Após longo processo foram escolhidos os mapas com as características apresentadas nas figuras 3.20, 3.21 e 3.22.



Figura 3.19 – Parâmetros de cálculo de semivariograma a partir de amostras irrergularmente espaçadas. (spud Camargo, 1997).

Os processos de obtenção do melhor mapa são iterativos. São testados diversos valores de raios de busca e tamanho de *lag*. São obtidos diversos mapas com características semelhantes. Porém as variâncias podem ser maiores ou menores devido à segregação das amostras. Após longo processo foram escolhidos os mapas com as características apresentadas nas figuras 3.20, 3.21 e 3.22.

A Figura 3.20 apresenta o mapa de variograma da propriedade de Raios Gamma, após diversas tentativas o raio de busca de 3000 m dividido em 10 *lags* foi considerado com melhores características para o auxilio da obtenção do variograma final. O mapa de variograma auxilia na escolha das direções principais dos variogramas feitos para cada zona. Pode-se observar na Figura 3.20 alcances de aproximadamente 1200 m onde a variância atinge seu patamar.

A Figura 3.21 apresenta o mapa de variograma da propriedade de densidade com raio de busca de 3500 m e número de *lags* igual a 30. É possível observar um alcance de aproximadamente 1800 m e é possível visualizar as direções principais. Auxiliando na construção do variograma final.



Figura 3.20 - Mapa Variograma de Raios Gamma. (Raio de busca = 3000m, número de *lags* 10).

A Figura 3.22 apresenta finalmente o mapa de variograma da propriedade sônica onde é possível visualizar as direções principais dos variogramas. O raio de busca encontrado foi de 11000 m e número de *lag* igual a 40.

Como segunda etapa são construídos variogramas isotrópicos, para auxiliar na construção do variograma final. Da mesma maneira que os mapas são construídos, a construção dos variogramas isotrópicos são processos iterativos. São testados diferentes alcances e diferentes tamanhos de "*lag*" para auxiliar no processo final.

Na Figura 3.23 são apresentados os semi-variogramas experimentais para a propriedade sônica. Apresentam-se três semi-variogramas. Em rosa, com raio de busca 11200 m, em verde com raio de busca 20000 m e em laranja com raio de busca de 19000 m. Do diagrama laranja obteve-se o melhor variograma para a propriedade, caso fosse considerada isotrópica. Na cor vermelha o semivariograma teórico obtido dos processos obtidos. Este variograma vermelho possui um Efeito Pepita (Variância de duas observações) de nulo e alcance de 13125 m e patamar de 1. Neste se baseia a construção dos variogramas para cada zona.



Figura 3.21 - Mapa de variograma de Densidade (Raio de busca = 3500 m e número de lags = 30).



Figura 3.22 - Mapa de variograma de Sônico (Raio de Busca = 11000 m e número de lags = 40).



variogramas com o modelo teórico exponencial.

Na terceira etapa do processo de modelagem se inicia então o tratamento dos dados. Os dados passam a ser analisados limitados a zona da malha onde se encontram. Isso ocorre porque cada formação de idades geológicas diferentes pode apresentar características diferentes nas suas propriedades. Como etapas iniciais deste tratamento de dados são analisadas os histogramas de distribuição de dados e posteriormente aplicadas transformações nos dados, eliminando tendências e vieses das amostras. A função principal é transformar os dados de maneira que se comportem de forma estacionária. A estacionaridade é uma hipótese necessária para aplicação dos métodos geostatísticos. O objetivo final dessas transformações é fazer com que o diagrama apresente uma distribuição normal de média 0 e desvio padrão de 1. Estas transformações posteriormente são reaplicadas aos dados após a interpolação geostatística, logo estão presentes na estimativa final.

Neste trabalho foram modeladas três diferentes propriedades para obtenção do cubo de pressão de poros. Raios Gamma, Densidade e Sônico.

Nos perfis sônicos e de densidade foi possível remover uma tendência unidimensional das propriedades e, posteriormente, aplicar uma transformação de escala e localização conforme a Figura 3.24.



Figura 3.24 - Analise de dados - Transformação de tendência unidimensional e de

escala.

Na quinta etapa do processo de análise de dados são construídos os variogramas finais que serão utilizados para a estimativa final das propriedades. O algoritmo de krigagem utilizado no software Petrel® foi a Krigagem Ordinária.

Na Figura 3.25 é apresentado um exemplo dos variogramas gerados para a modelagem das propriedades. Foram gerados variogramas para as direções vertical e de maior e menor alcance para cada, propriedade e para cada zona definida. Totalizando 45 –semi-variogramas utilizados neste problema (3 direções, 5 zonas e 3 propriedades). A utilização dos mapas variogramas e dos variogramas isotrópicos foram fundamentais para a construção destes.



Figura 3.25 - Variograma da propriedade sônico na zona 3 na menor direção.

Finalmente é apresentado na Figura 3.26 a janela do software Petrel® onde é possível escolhar o raio de busca e o tamanho do lag das propriedades. Na Figura 3.26 é apresentado o resultado da análise geostatítisca da propriedade sônica na terceira zona.

Como resultados finais foram obtidos os cubos das propriedades de Raios Gamma, Densidade e Sônico. E estes são apresentados nas Figuras 3.29, 3.30 e 3.31.

O software Petrel® apresenta ferramentas onde é possível comparar os dados modelados com os dados inicialmente carregados no modelo. É possível observar que os dados são bastante coerentes com os dados inseridos.

Na figura 3.27 é apresentado o histograma final do perfil sônico e dos resultados das krigagem realizada. Em azul visualiza-se o histograma da propriedade sônica, em verde das propriedades escalonadas e em vermelho o histograma dos perfis. Observa-se que apesar da suavização da estimativa, característica da técnica de krigagem, o comportamento global da distribuição é mantido.



Figura 3.26 – Análise estrutural de DT na zona 3.





Na Figura 3.28 é finalmente apresentado um dos cubos gerados pela geostatística das propriedades sônicas.

A verificação das propriedades foi realizada para cada zona e cada propriedade modelada.



Figura 3.28 - Cubo de propriedade sônica.

Nas figuras 3.29 e 3.30 são apresentadas as propriedades de densidade e de Gamma Ray interpoladas.

Como alternativa para validação do modelo, os resultados da modelagem foram comparados com os dados de um poço não incluído no modelo. Na Figura 3.31 é apresentado o perfil densidade do poço DB-34HPA, o qual não teve seus perfis carregados no *upscale*. Para este poço foi feita um novo *upscale* com os mesmos critérios adotados anteriormente e comparado com os dados de perfil e o resultado final. O perfil RHOB apresentado com linha rosa, o dado *upscaled* (RHOB *upscaled*) apresentado em rosa tracejado e o perfil RHOB obtido da krigagem (RHOB Krigagem) apresentado em linha grossa rosa. Nota-se na figura que o resultado da krigagem apresenta valores muito próximos dos valores reais do perfil.

As propriedades modeladas serão utilizadas finalmente para a construção do cubo de pressão de poros que será apresentado no capítulo 4.

Figura 3.30 - Cubo de propriedade Gamma Ray.

