



**TENDÊNCIAS TEXTURAIS EM TURBIDITOS TERCIÁRIOS DA SUB-BACIA DE PEÏRA CAVA (FORMAÇÃO GRÈS D'ANNOT, SE DA FRANÇA)**

Porto Alegre, 2015

**ANDREAS EMILIO GRINGS**

**TENDÊNCIAS TEXTURAIS EM TURBIDITOS TERCIÁRIOS DA SUB-BACIA DE  
PEÏRA CAVA (FORMAÇÃO GRÈS D'ANNOT, SE DA FRANÇA)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadora:** Profa. Dra. Karin Goldberg

**Supervisor:** Dr. George Pantopoulos

Porto Alegre, 2015

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Grings, Andreas Emilio

Tendências texturais em turbiditos terciários da Sub-bacia de Peira Cava (Formação Grès d'Annot, SE da França) . / Andreas Emilio Grings. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015.  
[59 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es):Karin Goldberg  
Coorientador(es):George Pantopoulos

1. Sub-bacia de Peira Cava 2. Turbiditos 3. Tendências texturais 4. Formação Grès d'Annot I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank

CRB 10/571

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **“TENDÊNCIAS TEXTURAIS EM TURBIDITOS TERCIÁRIOS DA SUB-BACIA DE PEÏRA CAVA (FORMAÇÃO GRÈS D’ANNOT, SE DA FRANÇA) ”** elaborado por **“ANDREAS EMILIO GRINGS”**, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Prof. Dr. Sérgio R. Dillenborg

---

Doutoranda Renata Alvarenga

---

Doutoranda Ana Santana

## AGRADECIMENTOS

Esta monografia não representa somente o meu trabalho ao longo desses dois anos junto ao projeto *Deep Marine Systems Tools*, representa o conjunto de experiências fantásticas que se sucederam depois daquela conversa com uma provável orientadora. Cabe ressaltar que este trabalho é fruto da parceria entre a UFRGS, BG e ANP, financiado a partir de capital oriundo da Lei de Participação Especial.

Antes de tudo gostaria de agradecer imensamente à querida Karin Goldberg por ter proporcionado a oportunidade de participar deste projeto ambicioso que foi o *DMS Tools* e pegar uma fração dele e transformar no meu projeto temático. Muitíssimo obrigado pela paciência e compreensão demonstradas ao longo desses dois anos de tutela. Aposto que não foi nada fácil! Sinto-me honrado que tenhas me aceito como orientando e acredito que aprendi imensamente ao longo desta jornada.

Ao magnífico George Pantopoulos, o melhor supervisor grego que alguém poderia querer. Seja pela dedicação imensurável e esforço hercúleo demonstrado para que esse trabalho se concretizasse, seja pelas piadas e palavrões que alegravam os momentos de desespero. Fica registrada minha enorme gratidão em ter trabalhado contigo e descoberto o incrível mundo da análise granulométrica. *La deux!*

À equipe do *DMS Tools*, especialmente Kristina e Adam, por terem me aguentado quase um mês enfiados em uma cabana nos Alpes. Aprendi muito com vocês, muito obrigado. Sem falar nos colegas de microscopia, Ricardo e Diego, obrigado por terem compartilhado a emoção de medir grãos em lâmina delgada.

Aos colegas da sala 204, Adriano, Eduardo e Ezequiel, pela companhia procrastinadora no *playground* das trevas. Nada supera a improdutividade da Tríade reunida! Vale mencionar a Patricia, que completa a comitiva de Tamriel e merece meus sinceros agradecimentos.

Aos colegas do departamento de Estratigrafia, Raquel, Francyne, João, Daiane, Carrel, Lucas, Camila, e outros que posso ter me olvidado. Um obrigado

especial à Luciane e ao Carlinhos pelo indispensável auxílio sempre quando necessário.

Aos geoformados 2015/2, foi um prazer trilhar esses 6 anos de geologia ao lado de vocês e dividir agora os gloriosos louros da formatura.

À minha família, obrigado pelo incentivo e apoio. Sem vocês eu não teria chegado tão longe.

Enfim, agradecer às rochas, porque sem elas este trabalho não poderia ter sido realizado.

*“What is better -*

*To be born good*

*Or to overcome you evil nature through great effort?”*

(Paarthurnax, The Elder Scrolls V: Skyrim)

## RESUMO

A Sub-bacia de Peira Cava, de idade terciária, aflora na porção SE da França, departamento dos Alpes Marítimos, região da Provença-Alpes-Riviera. A Formação Grès d' Annot consiste em uma sucessão turbidítica depositada em contexto de águas profundas durante o evento transgressivo do Terciário na Bacia de Annot. A presente pesquisa buscou, através da aplicação de técnicas estatísticas de análise granulométrica, caracterizar as tendências texturais de camadas-chave dessa unidade. O estudo visou demonstrar a efetividade das técnicas de análise estatística das propriedades granulométricas em arenitos, parâmetro essencial na caracterização da qualidade de reservatório, através da integração de dados sedimentológicos, petrográficos e estratigráficos. Observou-se que os arenitos turbidíticos estudados apresentam gradação normal e um aumento da seleção em direção ao topo da camada. Intervalos maciços mostraram-se gradados apenas para a fração grossa, com gradação inversa localizada na base da camada. Tais observações sugerem uma sedimentação controlada pela perda de capacidade do fluxo, e não pela desaceleração do fluxo. O uso das tendências de granulometria para a classificação dos elementos arquiteturais em sistemas marinhos profundos pode fornecer uma ferramenta na caracterização de sistemas turbidíticos em subsuperfície, que é crucial para melhorar o planejamento de exploração de hidrocarbonetos e desenvolvimento de campos petrolíferos.

**Palavras-Chave:** Sub-bacia de Peira Cava, turbiditos, tendências texturais.

## ABSTRACT

The Tertiary Peira Cava Sub-basin crops out in the Maritime Alps region in SE France. The basin hosts a well-exposed turbidite sequence which was deposited in confined, deep-water basins during the Eocene-Oligocene (Grès d'Annot Formation). This research attempts to characterize the textural trends of key sandstone layers of this sub-basin through the application of statistical techniques for particle size analysis. In particular, the present study aims to demonstrate the effectiveness of quantitative textural analysis in deep-water sandstones, an essential parameter in reservoir quality characterization, by integrating sedimentological, petrographic and stratigraphic data. Thick-bedded sandstones of the Peira Cava Sub-basin which are correlatable across the basin show normal grading and a tendency of increasing-upward in sorting towards the top of the studied beds. Massive sandstone intervals lacking tractive structures display grading only in the coarse fraction of the grain-size distribution, along with reverse grading at the base of the beds. The studied beds display less well-expressed grading patterns or no grading at all at the finer fraction of the grain-size distribution. Such observations suggest that sedimentation was product of high-density gravity flows (turbidites) controlled by the loss of flow capacity, as opposed to the classic turbidite sedimentation model which predicts sedimentation controlled by flow competence. Capacity-controlled sedimentation from high-density flows seems to be more dominant in beds at the more proximal sections of the basin (proximal base of slope beds) and its effect is reduced downcurrent (distal basin floor beds). The use of textural trends for the classification of architectural elements in deep marine systems can provide a tool for the characterization of turbidite systems in the subsurface, which is crucial for improving hydrocarbon exploration and development of oil fields.

**Keywords:** Peira Cava sub-basin, turbidite, textural trends.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Localização da área de estudo e geologia geral da área (modificado de Amy et al., 2007).</i>	17
<i>Figura 2 Diagrama esquemático para a definição de fluxos de densidade de sedimentos subaquosos, indicando mecanismos de sustentação de grãos, perfis de velocidade ideais, forma ideal do fluxo e seções sedimentares esquemáticas (adaptado de Mulder &amp; Alexander, 2001).</i>	20
<i>Figura 3 Coluna litoestratigráfica da Bacia de Annot (adaptado de Ravenne et al., 1987 e Joseph &amp; Lomas, 2004)</i>	23
<i>Figura 4 Mapa topográfico da região de Peira Cava (modificado de Amy et al., 2013)</i>	25
<i>Figura 5 Mapa geológico da sub-bacia de Peira Cava indicando as seções estudadas. Dados do Projeto DMS Tools (2014)</i>	27
<i>Figura 6 Mapa geológico da sub-bacia de Peira Cava indicando os pontos de amostragem da camada MU5. Dados do Projeto DMS Tools (2014)</i>	30
<i>Figura 7 Exemplo de camada amostrada destacando os pontos de amostragem (pontos vermelhos).</i>	32
<i>Figura 8 Diagrama esquemático do caminhamento em lâmina.</i>	33
<i>Figura 9 Fotografia da tela de trabalho do software JMicrovision.</i>	34
<i>Figura 10 Variação vertical da granulometria e grau de seleção da camada-guia MU5 nas seções 1, 2 e 7 (A, B e C, respectivamente; perfis colunares à esquerda), com os percentis de 5% (D5), 50% (D50) e 95% (D95) das amostras analisadas.</i>	39
<i>Figura 11 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Paerson para a fração fina (D5) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes.</i>	49
<i>Figura 12 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Mann-Kendall para a seleção (SD) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes</i>	49
<i>Figura 13 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Mann-Kendall para a fração grossa (D95) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes</i>	50

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1</i> Número de amostras coletadas na camada-guia por seção. _____	31
<i>Tabela 2</i> Resultados do teste de correlação de Mann-Kendall para as camadas totais. _____	41
<i>Tabela 3</i> Resultados do teste de correlação de Mann-Kendall para as porções maciças. _____	41
<i>Tabela 4</i> Resultados do teste de correlação de Pearson para a camada total. ____	43
<i>Tabela 5</i> Resultados do teste de correlação de Pearson para a porção maciça. _	43

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	14
<b>1.2 Problemas</b> .....	14
<b>1.3 Premissas</b> .....	15
<b>1.4 Hipóteses</b> .....	15
<b>1.5 Objetivos e Metas</b> .....	16
<b>1.6 Localização da área de estudo</b> .....	16
2. ESTADO DA ARTE .....	18
<b>2.1 Definições</b> .....	18
<b>2.2 Classificação de tipos de fluxos</b> .....	19
<b>2.3 Contexto geológico</b> .....	21
<b>2.4 Estratigrafia Regional</b> .....	22
2.4.1 Formação Calcaires Nummulitiques (Calcáreos Numulíticos).....	23
2.4.2 Formação Marnes Bleues (Margas Azuis).....	24
2.4.3 Formação Grès d'Annot.....	24
<b>2.5 Sub-bacia de Peira Cava</b> .....	25
3. MÉTODOS E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO .....	28
<b>3.1 Perfis colunares</b> .....	29
<b>3.2 Amostragem</b> .....	30
<b>3.3 Análise granulométrica</b> .....	32
<b>3.4 Análise estatística</b> .....	34
3.4.1. Testes de tendência .....	35
3.4.1.1. Teste de Mann-Kendall .....	36
3.4.1.2. Teste de Pearson.....	37
4. RESULTADOS.....	38
5. DISCUSSÃO.....	44

<b>5.1</b>	<b>Gradação Normal em Arenitos.....</b>	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>Intervalos Maciços .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3</b>	<b>Gradação Inversa .....</b>	<b>45</b>
<b>5.4</b>	<b>Seleção .....</b>	<b>47</b>
<b>5.5</b>	<b>Quebras de Granulometria.....</b>	<b>47</b>
<b>5.6</b>	<b>Correlação de Tendências.....</b>	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>58</b>

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Justificativa

Este trabalho se propõe a testar a efetividade das técnicas de análise estatística das propriedades granulométricas em arenitos turbidíticos. O sucesso no uso das tendências de granulometria para a classificação dos elementos arquiteturais em sistemas marinhos profundos pode fornecer uma ferramenta na caracterização de sistemas turbidíticos em subsuperfície, que é crucial para melhorar o planejamento de exploração de hidrocarbonetos e desenvolvimento de campos petrolíferos.

A caracterização das propriedades texturais de turbiditos é de grande valia na caracterização da qualidade de reservatórios de hidrocarbonetos, principalmente no que condiz à permeabilidade e porosidade dessas rochas. Um melhor entendimento de reservatórios turbidíticos possibilita uma exploração mais eficiente das reservas encontradas em diversas partes do mundo, inclusive nas bacias de Campo, Santos e Espírito Santo, na margem leste do Brasil.

## 1.2 Problemas

Ambientes de águas profundas recebem grandes cargas de sedimento siliciclástico através da ação de fluxos de gravidade, cujas características texturais são consideradas como um importante indicador da hidrodinâmica do fluxo (Sylvester & Lowe, 2004). A presença de gradação normal aparenta ser uma das características-

chave de turbiditos, os quais tendem a ser mais pobremente selecionados que sedimentos de origem marinha rasa ou fluvial (Sylvester & Lowe, 2004). A gradação normal em cada camada e a diminuição da granulometria ao longo do eixo proximal-distal são previstos devido à natureza desacelerante do fluxo turbidítico. Entretanto, novas evidências demonstram que as tendências texturais de pacotes relativamente espessos de turbiditos arenosos aparentam ser mais complexas do que se pensava, com a presença de gradação inversa ou outros padrões ainda mais variados. Além da gradação granulométrica, a abundância e a distribuição de lama detrítica é uma característica importante de depósitos de fluxo gravitacionais arenosos, diretamente relacionado a seus processos de deposição. Estudos texturais mais detalhados são necessários para avaliar a complexidade das tendências granulométricas verticais observadas, já que desde a década de 1970 tem havido poucos estudos quantitativos sobre a textura de arenitos de águas profundas.

### 1.3 Premissas

O presente trabalho baseia-se nas seguintes premissas:

- Turbiditos são rochas formadas a partir de depósitos de correntes de turbidez depositadas em ambientes marinhos profundos.
- As feições texturais e faciológicas destas rochas são indícios dos processos sedimentares atuantes no momento da sua deposição.
- A granulometria, bem como as suas tendências texturais, é reflexo direto destes mesmos processos deposicionais.

### 1.4 Hipóteses

Em bacias semi-confinadas com paleotopografia de fundo (como a sub-bacia de Peira Cava), as relações texturais são complexas, não necessariamente apresentando gradação normal em camadas individuais e diminuição de granulometria da porção proximal para a distal do sistema turbidítico. A aplicação de técnicas de análise granulométrica e o tratamento estatístico destes dados permitiu a identificação de tendências texturais mais complexas, como gradação inversa e abruptas quebras de granulometria, oriundas da modificação do fluxo ao longo da sua trajetória devido à interação com a topografia de fundo.

## 1.5 Objetivos e Metas

O objetivo principal deste projeto foi testar a utilização da análise textural das camadas arenosas dos turbiditos da Formação Grès d'Annot, aliada às estruturas sedimentares, na interpretação da dinâmica desses fluxos, principalmente em seus estágios finais de deposição. Diferentes tendências de grãos foram comparadas em diferentes porções transversais e logitudinais de camadas de arenito correlacionadas em diferentes partes da sub-bacia de Peïra Cava. Este estudo também se concentrou em investigar a possível associação das observações acima com determinados processos de deposição ao longo de partes mais proximais ou distais dos depósitos marinhos estudados, visando um melhor entendimento dos depósitos de correntes de turbidez. Dentre as metas almejadas destacam-se:

- Aplicação de métodos modernos de análise estatística às propriedades texturais (granulometria e seleção) em camadas-chave da bacia;
- Identificação de tendências de variação granulométrica verticais e horizontais (no eixo proximal-distal) da camada-guia;
- Identificação dos processos deposicionais atuantes no sistema através da definição das relações entre as estruturas sedimentares e tendências texturais dos pacotes;
- Análise do padrão textural em relação a diferentes elementos arquiteturais do sistema turbidítico.

## 1.6 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada na região sudeste da França, conhecida como Alpes Marítimos, a 50 km de Nice, compreendendo a vila de Peïra Cava e seus arredores (Figura 1).

Os principais afloramentos constituem cortes de estrada ao longo das rodovias M70 e D2566, sendo de fácil acesso e em bom estado de conservação.

A unidade geológica estudada é a Formação Grès d'Annot, de idade eocênica-oligocênica, aflorante na porção da bacia denominada de Sub-bacia de Peïra Cava.

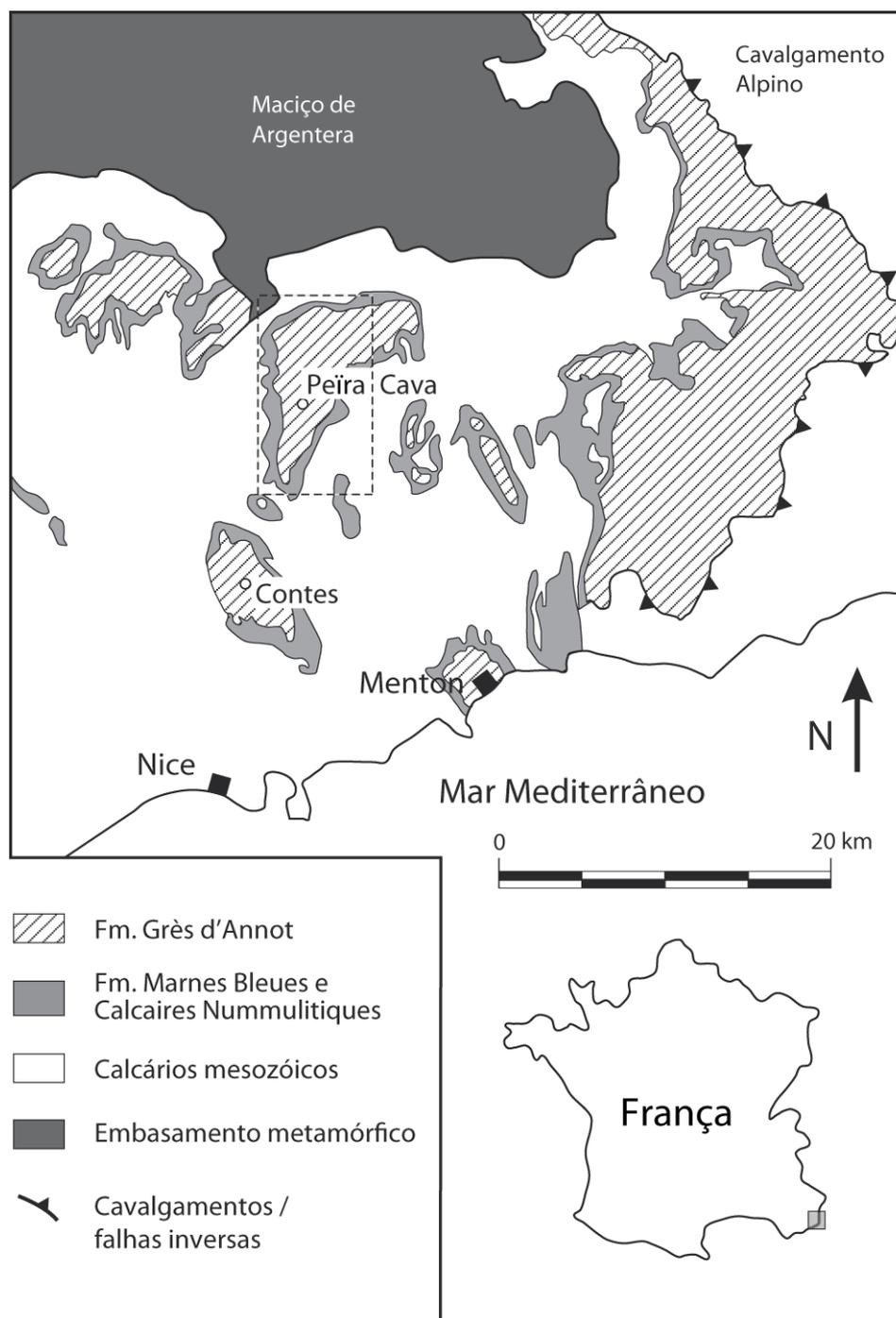


Figura 1 Localização da área de estudo e geologia geral da área (modificado de Amy et al., 2007).

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Fluxos de densidade submarinos foram responsáveis pela criação de algumas das maiores e mais espessas acumulações de sedimento na Terra, tanto no assoalho oceânico moderno quanto no registro geológico (Bouma & Coleman, 1985; Tor Helge Nilsen, 2007). Estes depósitos abrigam algumas das maiores reservas de óleo e gás (Weimer & Pettingill, 2007). Muito do entendimento desses fluxos advém dos seus depósitos sedimentares, preservados em afloramentos e no fundo oceânico atual, já a sua monitoração direta tem se mostrado extremamente desafiadora (Talling et al., 2012).

### 2.1 Definições

Historicamente o termo corrente de turbidez foi usado para denotar um fluxo carregado de sedimento que desce o talude devido ao seu excesso de densidade (Kuenen & Migliorini, 1950). Essa definição original deriva da palavra túrbido (carregado de sedimento) ao contrário da palavra turbulento. De acordo com essa definição, uma corrente de turbidez não necessariamente precisa carregar o sedimento através de intensa turbulência do fluxo, outros mecanismos de transporte podem ter importância.

Uma abordagem mais recente (Mulder & Alexander, 2001) faz uso do termo fluxo de densidade submarino (*subaqueous sedimentar density flow*) para fluxos subaquosos conduzidos pelo excesso de densidade. A palavra sedimentar reforça o fato de que o excesso de densidade se dá pelo excesso de sedimento na corrente. Esta abordagem é menos sucinta do que corrente de turbidez, a qual se mostra amplamente entendida pelo público geológico em geral.

## 2.2 Classificação de tipos de fluxos

Uma classificação simplificada de fluxos de densidade submarinos está apresentada na Figura 2, que se baseou em coesão das partículas, duração do fluxo, concentração de sedimento e mecanismo de suporte de partículas (Mulder & Alexander, 2001).

Fluxos de densidade submarinos podem ser subdivididos de acordo com a diferença de densidade entre o fluxo ( $\rho_f$ ) e a água circundante ( $\rho_w$ ). Isto permite a definição de quatro tipos de fluxo: fluxo hipopicnal se  $\rho_f > \rho_w$ ; fluxo homopicnal se  $\rho_f = \rho_w$ ; fluxo hiperpicnal se  $\rho_f < \rho_w$ ; e fluxo mesopicnal se  $\rho_f$  está entre a densidade de duas camadas de águas numa coluna estratificada. Este sistema de classificação é uma simplificação, já que a turbulência do ambiente pode transformar fluxos hiperpicnais ou hipopicnais em fluxos homopicnais.

Fluxos sedimentares hiperpicnais são subdivididos de acordo ao seu comportamento reológico, sendo a distinção mais importante entre fluxo predominantemente coesivos e friccionais. Fluxos coesivos possuem a competência da matriz como resultado da coesão entre partículas, que resiste à entrada de água para dentro do fluxo, mantendo a unidade do fluxo. Diferentemente de fluxos friccionais que são constituídos de partículas discretas e podem desenvolver alta porosidade durante o fluxo, que, em ambiente subaquoso, está predominantemente preenchida por água.

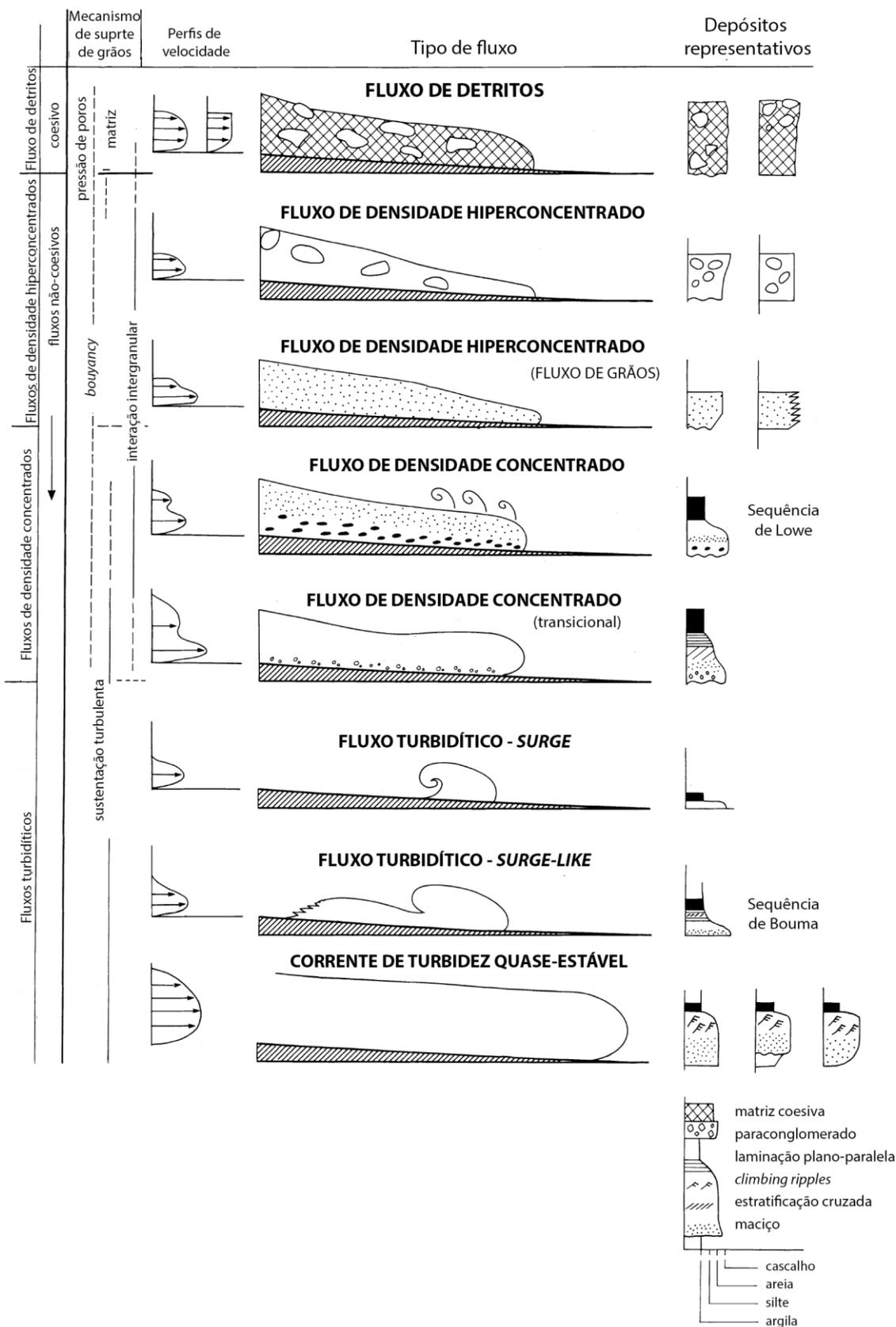


Figura 2 Diagrama esquemático para a definição de fluxos de densidade de sedimentos subaquosos, indicando mecanismos de sustentação de grãos, perfis de velocidade ideais, forma ideal do fluxo e seções sedimentares esquemáticas (adaptado de Mulder & Alexander, 2001).

A subdivisão de fluxos submarinos friccionais é baseada primariamente na concentração de sedimento, com três classes principais: fluxos de densidade hiperconcentrados, fluxos de densidade concentrados e correntes de turbidez. O limite de Bagnold para suspensão turbulenta ( $C = 9\%$ ) é utilizado como limiar entre fluxos turbidíticos *sensu stricto* e fluxos de densidade concentrados. A aplicação desse limite pode se mostrar difícil (ou impossível) no campo, devido a incertezas relacionadas à natureza dos depósitos e o comportamento contínuo do fluxo. A presença de uma gradação normal bem marcada pode ser típica de depósitos de suspensão a partir de um fluxo dominado por turbulência. A divisão entre fluxos hiperconcentrados e concentrados também é complicada de ser definida. Em ambos os casos, o limite deveria ser baseado em um limiar físico relacionado à sustentação de partículas. Um limiar proposto é a concentração de sedimento quando a seleção de partículas pode ocorrer livremente através de assentamento de partículas durante a passagem do fluxo.

Esta classificação inclui um amplo espectro de contínuos dentro da categoria de fluxos de densidade concentrados, já denominados de correntes de alta densidade anteriormente (Lowe, 1982).

Um fluxo turbulento constante ocorre quando a velocidade média em um ponto se mantém inalterada durante um período de tempo específico. Na natureza, todos os fluxos de densidade são inconstantes, mas em algumas situações, a velocidade média pode se aproximar bastante dessa condição num período de horas a dias. Como consequência, fluxos turbidíticos podem ser subdivididos em pulsos (surges) de curta duração e fluxos assemelhados a pulsos, em que o comportamento da cabeça do fluxo é de maior importância; e correntes de turbidez mais duradouras (fluxos quase-estáticos), quando o comportamento da cabeça do fluxo é de menor importância para o caráter deposicional do fluxo quando comparado com compressos que ocorrem no corpo da corrente.

### 2.3 Contexto geológico

O interesse de acadêmicos pela região da Bacia de Annot já soma mais de 150 anos de estudos na área. Inicialmente o objetivo era estratigráfico (identificação das formações contemporâneas presentes na região, correspondentes a sistemas

continentais a marinhos) e estrutural (reconhecimento de grandes deslocamentos das *nappes* alpinas) (Joseph & Lomas, 2004).

Nas décadas de 1950 e 1960 iniciaram-se os estudos relacionados à sedimentologia de sistemas marinhos profundos, com a popularização do conceito de turbidito e seu reconhecimento em campo (Bouma, 1962; Faure-Muret et al., 1956; Kuenen et al., 1957; Lanteaume et al., 1967) e desenvolvimento do primeiro modelo de *canyon* submarino/*fan valley* (Stanley, 1961).

Durante os anos 1980, novas pesquisas na área foram motivadas pela popularização da sismoestratigrafia; a Formação Grès d'Annot foi novamente tema de estudos que auxiliaram a interpretação sísmica. Paralelamente experimentos com plumas e avalanches submarinas foram desenvolvidos a fim de se obter um maior entendimento das correntes de turbidez (Laval et al., 1988).

Os estudos da década de 1980 levaram ao primeiro trabalho paleogeográfico para a Bacia de Annot como um todo, baseado em paleocorrentes, orientações de *onlap* e correlação de camadas-chave (Ravenne et al., 1987). Estudos contemporâneos reconheceram a importância de dobramentos na topografia da bacia (Apps, 1985, 1987; Elliot et al., 1985).

Mais tarde na década de 1990, surgiu uma nova onda de estudos com o desenvolvimento de trabalhos detalhados envolvendo a arquitetura dos corpos arenosos turbidíticos com o intuito de melhorar a caracterização dos reservatórios de hidrocarbonetos em águas profundas análogos. A partir dessa época até hoje, muitas equipes de cientistas internacionais trabalharam na região com concepções complementares; organizou-se então em 2001 a Conferência de Sistemas Turbidíticos Confinados em Nice (pela IFP e Universidade de Aberdeen), cujo objetivo foi promover trocas entre as equipes, com o objetivo de estabelecer um estado da arte para o tema e identificar novos tópicos para futuras pesquisas.

## 2.4 Estratigrafia Regional

A sequência terciária da Bacia de Annot encontra-se depositada discordantemente sobre um embasamento mesozóico previamente deformado pela orogênese Pirenaico-Provençal (Cretáceo Superior a Eoceno Médio) (Figura 3).

Neste evento, o bloco da Ibéria colidiu contra a placa Europeia, criando uma série de estruturas orientadas E-W neste embasamento pré-terciário, também acarretando no soerguimento dos Maciços de Córsega-Sardenha, que atuariam como principal área fonte para a bacia (Kneller, 2013).

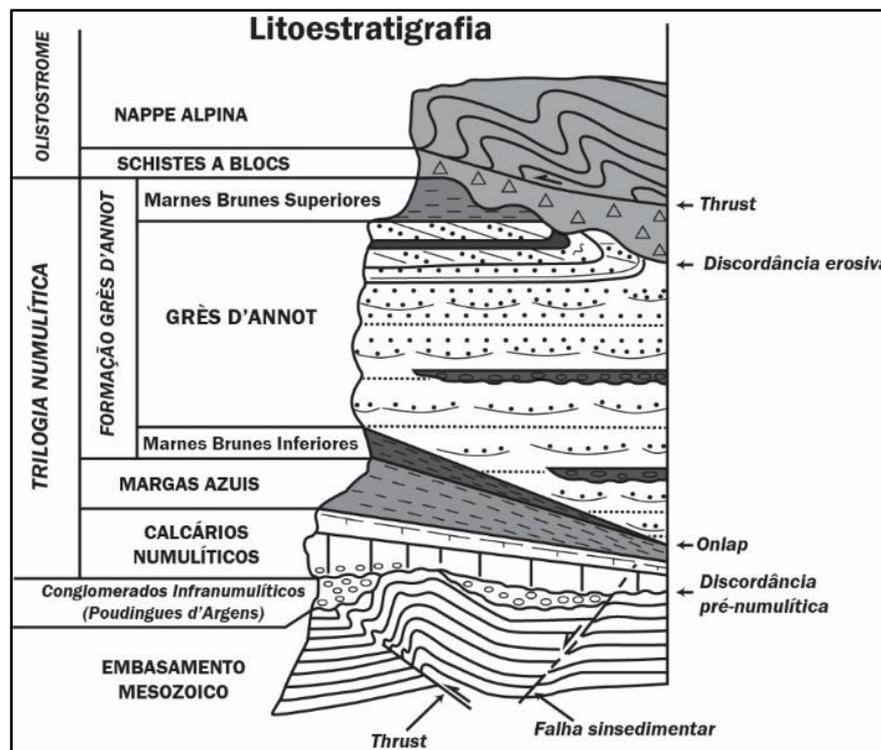


Figura 3 Coluna litoestratigráfica da Bacia de Annot (adaptado de Ravenne et al., 1987 e Joseph & Lomas, 2004)

O embasamento pode ser caracterizado basicamente por calcários e margas do Cretáceo Superior, cujo contato discordante com a sequência terciária é marcada localmente pelos Conglomerados Infranutulíticos (*Poudingues d'Argens*) preservados em depressões e nas bordas de paleoaltos (Apps, 1987). Estes conglomerados e arenitos são interpretados como depósitos fluviais entrelaçados que preencheram vales incisos com orientação geral NW, a mesma das paleocorrentes, refletindo uma rede de drenagem a partir do Maciço de Córsega-Sardenha (Ravenne et al., 1987).

#### 2.4.1 Formação Calcaires Nummulitiques (Calcários Numulíticos)

Na região, o embasamento é normalmente coberto por cerca de 200 m de calcários maciços; nas porções onde os Conglomerados Infranutulíticos estão presentes, a parte mais basal dos calcários terciários geralmente contém clastos dos

calcários cretáceos, ocasionalmente com traços fósseis de tipo *Lithophaga*, situação que indica que houve retrabalhamento dos depósitos fluviais por sistemas marinhos rasos (Kneller, 2013). Os calcários numulíticos são normalmente caracterizados pela abundância de foraminíferos Numulítídeos, que também nomeiam a formação. Este intervalo é composto por calcários bioclásticos e brechas ressedimentadas, interpretados respectivamente como depósitos marinhos rasos e de talude, formados no início do evento transgressivo do Terciário (Joseph & Lomas, 2004).

#### 2.4.2 Formação Marnes Bleues (Margas Azuis)

Os calcários da Formação *Calcaires Nummulitiques* gradam verticalmente para a Formação *Marnes Bleues*, passando por uma camada de cerca de 20 m de espessura de margas transicionais. As margas azuis caracterizam-se por sua estrutura maciça e o típico relevo *badlands* observado nas áreas de afloramento. Elas representam a sedimentação hemipelágica depositada em contexto de talude ou rampa distal (Joseph & Lomas, 2004; Kneller, 2013). O conteúdo de macrofósseis é praticamente ausente nesses estratos, mas os microfósseis presentes indicam uma crescente profundidade, com uma lâmina d'água estimada em 100 m na base da sequência, podendo chegar a 900 m no topo (Mougin, 1978).

#### 2.4.3 Formação Grès d'Annot

Os arenitos da Formação Grès d'Annot são basicamente depósitos de fluxos gravitacionais (turbiditos siliciclásticos e fluxos de detritos) que se dispõem em onlap sobre o paleotalude da Formação Marnes Bleues em um ângulo de até 20° (Joseph & Lomas, 2004). A deposição dos turbiditos foi diácrona na bacia, provavelmente influenciada tanto pelo evento de rebaixamento do nível do mar no Eoceno Superior, quanto pelo soerguimento do Maciço de Córsega-Sardenha quando o Oceano Liguriano começou a se abrir (Ravenne et al., 1987).

Os padrões regionais de paleocorrentes mostram claramente que a área fonte do sistema estava a sul, mas com considerável variação local que refletiria o represamento e a deflexão das correntes de turbidez pela paleotopografia do assoalho marinho. Em grande escala a bacia é assimétrica, sendo mais profunda para NE. Os remanescentes da porção norte da bacia, Col de la Cayolle e Trois Evêchés, podem ser correlacionados e indicam transporte axial para W e NW (Elliot et al., 1985; Ravenne et al., 1987). Eles consistem em sistemas confinados proximais (Col de la



Estudos iniciais acerca da sedimentação turbidítica na área previram um sistema de canyon e leque submarinos, incluindo elementos deposicionais de canal e *overbank* (Bouma & Coleman, 1985; Bouma, 1990; Ravenne et al., 1987; Stanley & Mutti, 1978; Stanley, 1993). Nesses estudos foi dada atenção a corpos arenosos descontínuos e espessos, equivalentes a canais, preservados em uma série de afloramentos mais a sul. Recentemente outros estudos focaram na geometria em lençol das camadas e sugeriu-se uma deposição dos turbiditos em uma bacia represada, no contexto de um sistema submarino análogo aos sistemas modernos presentes no Golfo do México (Amy et al., 2000, 2007; Hilton, 1994; McCaffrey & Kneller, 2001; Pickering & Hilton, 1998). O represamento de fluxos pôde ser interpretado com base em (1) relações de *onlap* entre os turbiditos da Formação Grès d'Annot sobre a Formação Marnes Bleues, (2) espessas capas pelíticas sobre camadas de turbiditos sugerindo aprisionamento de material fino e (3) dados de paleocorrentes em laminação cruzada sugerindo reflexão das porções mais diluídas do fluxo contra a paleotopografia do fundo marinho (Amy et al., 2007; McCaffrey & Kneller, 2001).

Correlações efetuadas em seções verticais (Figura 5) indicam que a continuidade lateral das camadas se dá na escala de alguns quilômetros em certos níveis estratigráficos (Pickering & Hilton, 1998). Além disso, os espessos corpos arenosos encontrados em afloramentos no sul foram reinterpretados como o preenchimento de calhas de *bypass* (Kuenen et al., 1957; McCaffrey & Kneller, 2001; Pickering & Hilton, 1998).

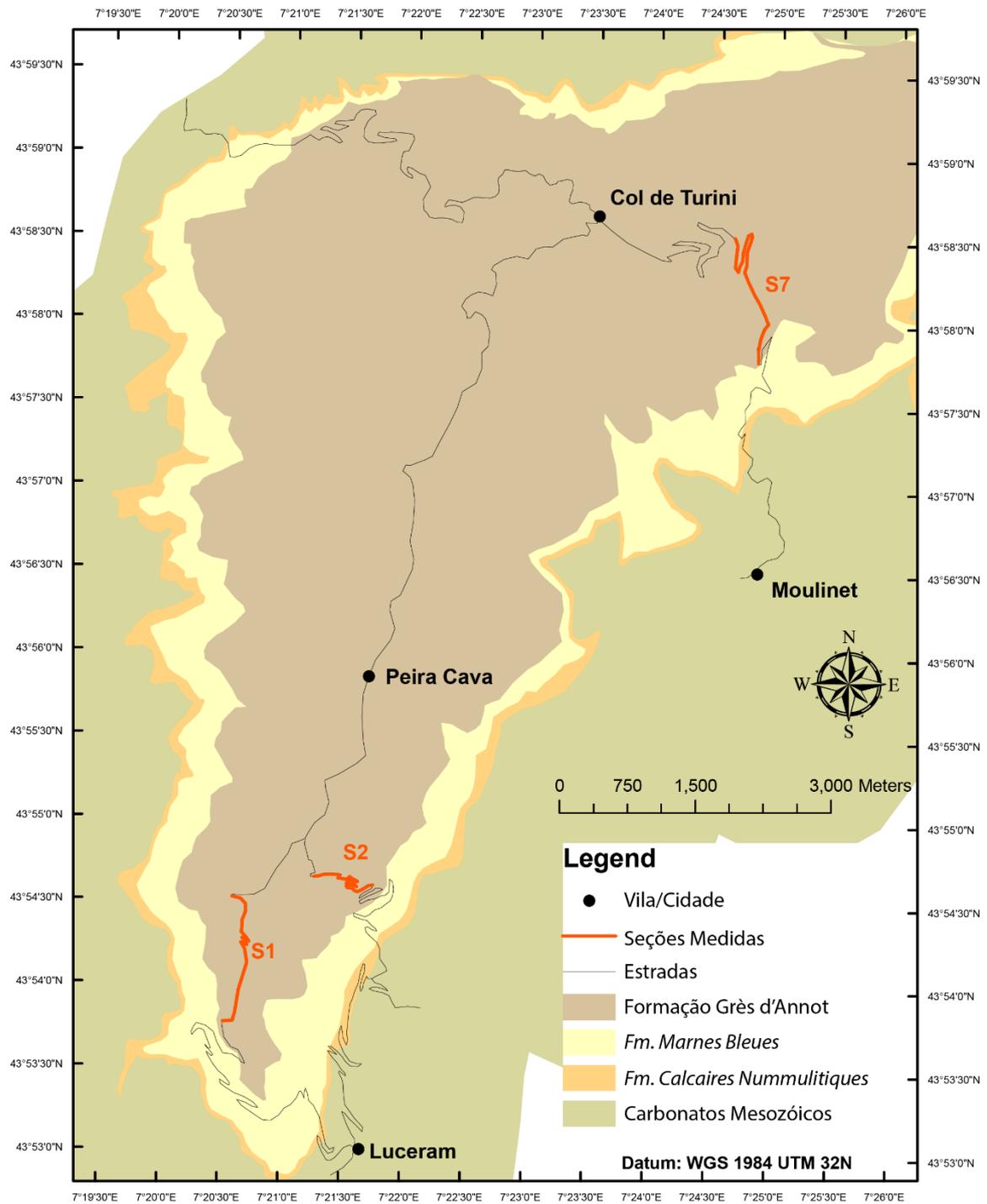


Figura 5 Mapa geológico da sub-bacia de Peira Cava indicando as seções estudadas. Dados do Projeto DMS Tools (2014)

---

### 3. MÉTODOS E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

---

O trabalho foi dividido em três etapas principais, sendo elas: aquisição, quantificação e processamento. Concomitantemente a estas etapas, realizou-se a revisão da bibliografia de maneira contínua durante toda a duração do trabalho.

Na etapa de aquisição, que compreendeu basicamente o trabalho de campo, foram desenvolvidos todos os procedimentos relacionados à coleta de dados sedimentológicos através do levantamento de seções colunares de detalhe da camada-guia e coleta de amostras destas camadas.

A etapa de quantificação consistiu na medição do tamanho de grãos em lâmina delgada, feitas a partir das amostras coletadas na etapa anterior. Esta medição foi feita em 300 grãos escolhidos de maneira aleatória. O método para a quantificação da granulometria envolve a aquisição de uma fotografia para cada um dos 300 grãos a serem medidos usando o *software Leica Application Suite (LAS)*. Na imagem, é traçado o contorno do grão detrítico (excetuando crescimentos secundários, franjas e cutículas, etc.). Tal imagem é então analisada pelo *software JMicroVision* que gera uma tabela com os parâmetros característicos do grão a partir do traçado de seu contorno. Os dados gerados podem ser usados, além da análise granulométrica, na avaliação do grau de seleção, forma das partículas, etc.

Durante a etapa de processamento, os dados quantificados na etapa anterior foram processados e apresentados na forma de gráficos que integram dados de campo com produtos estatísticos obtidos através do *software* estatístico R. A partir dos itens confeccionados nesta etapa pôde ser iniciada a etapa de integração e interpretação do conjunto de dados.

A revisão da bibliografia correspondeu ao levantamento bibliográfico atualizado de trabalhos, artigos e publicações relacionadas à área de estudo, depósitos turbidíticos e correntes de turbidez em geral, bem como à aplicação de técnicas estatísticas e o significado das mesmas.

Em seguida serão descritas em detalhe todas as atividades realizadas nas três etapas principais do trabalho.

### 3.1 Perfis colunares

O levantamento de um perfil colunar é uma maneira de representar graficamente a sucessão vertical de fácies de uma área aflorante, visando, neste caso, analisar o padrão de acumulação de uma camada específica.

Através do levantamento do perfil colunar é possível sumarizar um grande volume de dados (como textura, composição, estruturas sedimentares primárias, conteúdo fossilífero), verificar a existência de sucessões verticais de fácies, identificar variações granulométricas e de outros parâmetros, e ainda correlacionar seções em diferentes lugares.

O perfil colunar é representado em dois eixos: o eixo horizontal indica a granulometria do sedimento que forma cada camada, e o vertical representa a espessura de cada estrato. O empilhamento destes na escala escolhida (1:100 neste trabalho) representa cada pacote sedimentar.

Foram levantados 3 perfis colunares verticais em exposições das camada-guia em diferentes seções. Esses perfis incluíram os dados de estruturas sedimentares e granulometria e foram digitalizados no programa *Adobe Illustrator CS4*.

### 3.2 Amostragem

A amostragem da camada-guia é uma etapa vital dentro deste projeto, pois é a partir das amostras coletadas que serão inferidas as tendências texturais dos pacotes areníticos. Uma boa amostragem é sinônimo de representatividade do objeto de estudo, o que influencia diretamente nos resultados obtidos em etapas posteriores.

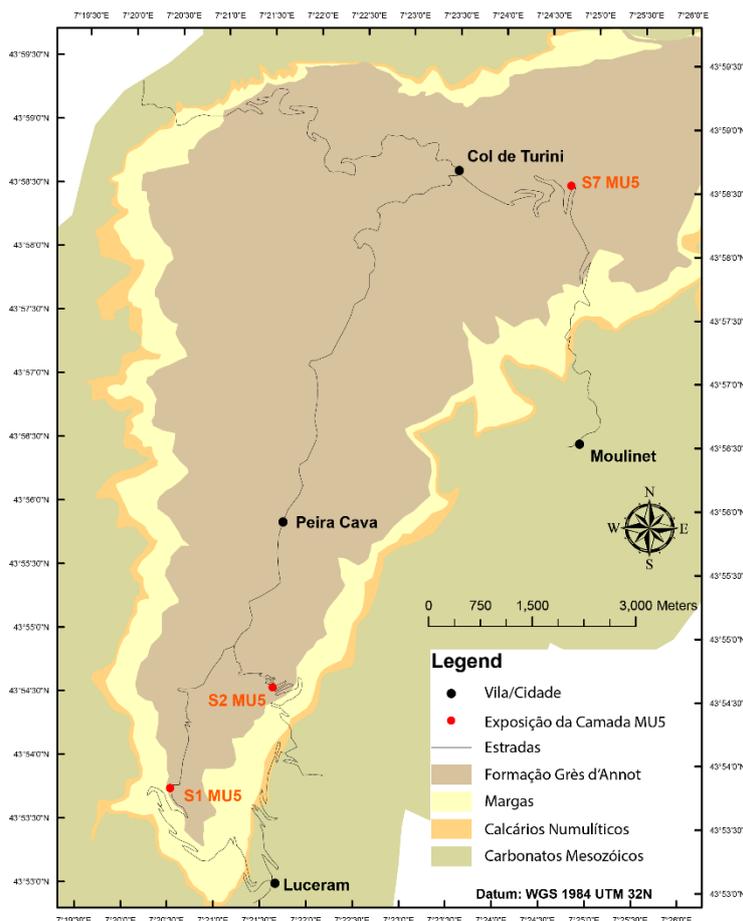


Figura 6 Mapa geológico da sub-bacia de Peira Cava indicando os pontos de amostragem da camada MU5. Dados do Projeto DMS Tools (2014)

Primeiramente foi feita a escolha da camada amostrada, a partir de uma correlação já proposta em trabalhos anteriores (Amy et al., 2007). Foi feito o reconhecimento da camada-alvo em três perfis levantados em rodovias da região de interesse (Figura 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Devido à facilidade de acesso e melhor exposição da litologia, teve-se a três perfis marginais a estradas, ao invés daqueles levantados a partir de cristas da montanha. Outro fator levado em

conta foi a localização do perfil dentro da bacia, ou seja, para que os perfis escolhidos fossem representativos de porções distais e proximais.

Para fins de correlação foram escolhidos dois perfis proximais e outro distal. Uma vez definidos os perfis, mapeou-se a continuidade da camada-guia, escolhidas por aflorarem nos perfis de interesse e serem facilmente detectáveis em campo, apresentando uma espessura significativa em relação a outras camadas do perfil e exposição contínua na seção. A identificação da camada-guia em campo mostrou-se uma tarefa por vezes complexa, devido ao pouco grau de detalhe dos perfis levantados anteriormente, que não incluíam todas as camadas aflorantes, e a fatores estruturais presentes em algumas seções, como falhamentos, dobramentos e basculamentos das camadas.

A amostragem foi efetuada com o uso de uma perfuratriz portátil modelo Milwaukee M18 que penetra no afloramento e retira um cilindro de rocha com 25 mm de diâmetro (Figura 7). Para confecção de uma lâmina delgada este cilindro precisa ter no mínimo 20 mm de espessura e a amostra deve ser retirada paralelamente ao acamadamento. O espaçamento ideal das amostras coletadas para este trabalho foi definido em 20-50 cm, sendo na prática extremamente variável, dependendo de fatores como mudança faciológica, espessura da camada e granulometria. Em camadas muito espessas o espaçamento chegou a 1,5 m, e intervalos conglomeráticos foram excluídos da amostragem. Devido a esses fatores que controlavam o espaçamento da amostragem, o número de amostras por seção também foi variável, com uma média de 14 amostras por seção (Tabela 1).

*Tabela 1 Número de amostras coletadas na camada-guia por seção.*

<b>Camada Amostrada</b>	<b>Seção S1</b>	<b>Seção S2</b>	<b>Seção S7</b>
<b>MU 5</b>	14	13	16
<b>Posicionamento</b>	Proximal	Proximal	Distal

As principais dificuldades decorrentes do processo de amostragem foram a representatividade efetiva das amostras e o fenômeno de *over-* e *undersampling*. A

coleta deve de fato representar as variações encontradas em campo. O erro decorrente pode ser minimizado seguindo uma amostragem correta, observando-se um espaçamento condizente com as mudanças faciológicas e granulométricas observadas. O fenômeno de *over-* e *undersampling* diz respeito à quantidade de amostras coletadas, em excesso ou insuficientes para caracterizar o objeto amostrado. Este erro é mínimo, de certa forma, e dificilmente mensurado em campo, mas pode ser detectado e quantificado em etapas posteriores do trabalho.



Figura 7 Exemplo de camada amostrada destacando os pontos de amostragem (pontos vermelhos).

### 3.3 Análise granulométrica

Subsequente à etapa de aquisição, foi realizada a etapa de quantificação das lâminas obtidas. Foram confeccionadas 43 lâminas, as quais foram feitas pelo laboratório *Spectrum Petrographics Inc.* em Vancouver WA, Estados Unidos. Esta fase é caracterizada pela técnica de análise granulométrica, que pode ser efetuada de diversas maneiras. Um método clássico consiste na desagregação da amostra e posterior peneiramento para se definir a granulometria de uma amostra. No presente trabalho, o método de desagregação seria pouco eficiente, já que se trata de rochas com alto grau de compactação e cimentação, que quando desagregadas, apontam para resultados errôneos, os quais não refletem a verdadeira granulometria da rocha original (Johnson, 1994). Optou-se então por executar a medição dos grãos em lâmina delgada, processo que melhor se enquadra na natureza das amostras deste trabalho.

A medição de grãos em lâmina delgada tem suas limitações, que são mensuráveis e relacionam-se com o corte aleatório dos grãos no momento da confecção da seção. A granulometria absoluta medida em lâmina está relacionada com a granulometria real segundo o fator  $0,2023 \phi$  (Johnson, 1994), ou seja, a granulometria medida é cerca de 20% menor que a real, quando o corte é perpendicular ao acamamento. Tal limitação não compromete este trabalho, já que serão levadas em conta tendências, que significam mudanças relativas nas características do grão, onde valores absolutos não tem significância.

A medição dos grãos em lâmina inicia pela seleção dos mesmos, que precisa ser aleatória, minimizando tendenciamentos por parte do responsável pela aferição. A aleatoriedade no momento da escolha do grão é garantida através de uma grade de pontos que divide a área da lâmina. As dimensões da grade foram definidas de modo que seja possível medir 300 pontos em uma lâmina, uma população significativa que confere robustez estatística ao dado. Este número foi definido levando em conta principalmente o grau de seleção do material, conforme discutido em outros trabalhos (Johnson, 1994). O caminhamento em lâmina seguiu a partir do topo em direção à base em linhas horizontais alternando o sentido, para a direita e depois para a esquerda, mas sempre perpendicular à estrutura da rocha (Figura 8).

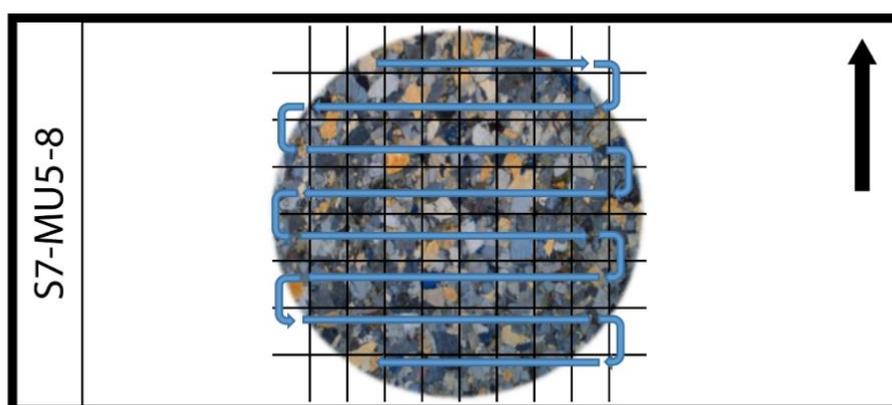


Figura 8 Diagrama esquemático do caminhamento em lâmina.

Ao longo das travessas que compõem a grade, fez-se a efetiva medição dos grãos, a partir de fotos individuais adquiridas com o programa *LAS*. A imagem foi importada pelo *software* de análise de imagem *JMicroVision*, no qual pode-se traçar o contorno dos limites do grão a ser medido (Figura 9). Com base nesse traçado, o

programa automaticamente ajustou uma elipse ao grão, e as características desta elipse foram aferidas. Dentre os parâmetros mais importantes que foram calculados estão a largura, o comprimento, a excentricidade e o alongamento. Uma classe para a composição também foi criada, com códigos simples que identificam a mineralogia do grão e adicionam mais um critério, que pode ser correlacionado, por exemplo, com a forma da partícula. Uma tabela com todos os dados referentes a uma lâmina delgada pode ser exportada para o programa *Excel* e posteriormente utilizada na etapa de processamento.

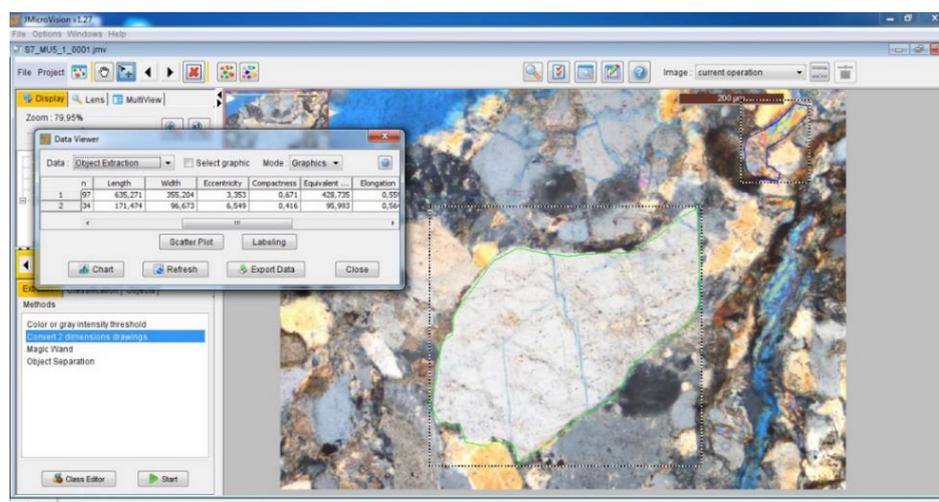


Figura 9 Fotografia da tela de trabalho do software JMikrovision.

O método utilizando o *software* de análise de imagem mostrou-se bastante completo, no que diz respeito à quantidade de parâmetros que podem ser medidos e à sua precisão matemática. A principal dificuldade em se aplicar a técnica está relacionada à demanda de tempo que esta requer. A eficiência é baixíssima, demorando no mínimo um dia inteiro de trabalho a aquisição de todos os dados de uma única lâmina delgada.

### 3.4 Análise estatística

A etapa de processamento compreendeu na análise estatística dos dados adquiridos na fase anterior, após a conversão destes para escala  $\phi$ . A média granulométrica calculada na escala  $\phi$  é uma medida mais acurada da tendência média do que a média aritmética derivada a partir dos dados em milímetros, e esta corresponde à média geométrica na escala métrica (Pierce & Graus, 1981).

A seleção do sedimento foi estimada usando o desvio-padrão da distribuição em  $\phi$  que tem um valor mínimo de  $0,284 \phi$  quando medido em lâmina delgada, no caso de um sedimento composto por grãos esféricos idênticos (Johnson, 1994). Barras de erro na média e no desvio-padrão foram definidas nos limites do intervalo de confiança de 95%, baseado nos erros padrões da média e do desvio padrão. O erro padrão da média é definido como

$$\sigma_m = \sigma / \sqrt{n}$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão da população e  $n$  é o número de contagens; o erro padrão do desvio padrão é dado por

$$\sigma_s = \sigma / \sqrt{2n}$$

O erro padrão tem uma distribuição normal somente para um grande número de amostras, condição que é satisfeita neste estudo, e apresenta uma estimativa da precisão do desvio padrão (Davies & Goldsmith, 1977).

#### 3.4.1. Testes de tendência

Uma série de observações de uma variável aleatória (granulometria, seleção, arredondamento, etc.) pode apresentar variações espaciais ou temporais, que determinam incrementos ou decrementos desta variável. Em termos estatísticos esta é a determinação de se a distribuição de probabilidade de que provêm mudou no espaço ou tempo, dada pelo resultado de um teste de tendência. Também se descreve a magnitude ou taxa de variação, em termos de mudança de um valor central da distribuição como a média ou mediana.

Um teste que raramente é feito em estudos texturais é a verificação de se as tendências granulométricas nas camadas e as diferenças de granulometria são estatisticamente significativas. Uma pequena diferença na média entre duas amostras de uma mesma camada não pode servir de evidência para tendências no tamanho de grão. Em muitos casos a diferença entre duas amostras adjacentes é tão pequena que a hipótese de populações idênticas não pode ser rejeitada. Entretanto, ainda é possível que diferenças sutis ao longo de diversas amostras sejam consistentes e mostrem tendências estatisticamente significativas.

Neste trabalho, com o objetivo de se analisar quantitativamente as tendências observadas, fez-se uso de dois testes comuns para a quantificação de tendências: o Teste de Mann-Kendall e o Teste de Pearson.

#### 3.4.1.1. *Teste de Mann-Kendall*

Sejam as observações de uma série, pode-se aplicar o teste de Mann-Kendall para tendência somente se a série for serialmente independente. Então, o teste pretendeu avaliar se as observações da série são independentes e identicamente distribuídas, isto é, testar as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{as observações da série são independentes e identicamente distribuídas (não há tendência);} \\ H_1: \text{as observações da série possuem tendência monotônica (há tendência).} \end{cases}$$

O resultado do teste é uma “decisão” – ou  $H_0$  é rejeitada ou não rejeitada. Falha em rejeitar  $H_0$  não significa que está “provado” que não existe tendência. Na verdade, esta é uma afirmação que a evidência disponível não é suficiente para se concluir que existe uma tendência.

O teste de Mann-Kendall calcula dois parâmetros característicos da série: fator de correlação tau (Kendall, 1938, 1975) e fator de significância p (Mann, 1945). Tau mede a intensidade da relação monotônica entre duas variáveis. Tau é calculado de maneira que apresenta robustez mesmo com valores anômalos para as variáveis calculadas (Davies & Goldsmith, 1977). Este fator de correlação se mostra útil para medidas granulométricas em lâmina delgada porque independe da grandeza absoluta das mesmas e não depende do tipo de distribuição da população de dados.

Tau ( $\tau$ ) pode variar entre os valores de -1 e +1, sendo que valores positivos significam uma tendência fortemente positiva e valores negativos, uma tendência fortemente negativa. Para valores próximos de zero, diz-se que a série não apresenta tendência.

Para se verificar a significância do teste, isto é, a validade estatística da tendência apresentada por  $\tau$ , calcula-se o fator de significância p (Mann, 1945). Para valores em que p assume valores significativamente diferentes de zero, a hipótese  $H_0$  deve ser aceita e não se comprova uma tendência para a série analisada. O limiar para o valor de p depende do nível de significância adotado. Normalmente estudos

estatísticos adotam um nível de significância de 95%, portanto o limiar para o valor de p fica estabelecido em 5% (0.05).

O teste de Mann-Kendall possui a vantajosa propriedade de ser invariante para transformações de potência das unidades utilizadas, por exemplo, a resposta do teste será a mesma numa escala normal ou logarítmica de uma mesma série.

#### 3.4.1.2. Teste de Pearson

O mais utilizado fator de correlação é o r de Pearson. Ele também é conhecido como coeficiente de correlação linear, porque mede a associação linear entre duas variáveis. Para valores que plotam ao longo de uma linha reta com caimento positivo, então r será igual a 1. Essa suposição de linearidade de uma série pode ser distorcida de a série apresentar uma distribuição curvada ou um número significativo de valores anômalos.

O fator de correlação de Pearson não é tão robusto a valores extremos como é tau, porque é computado de maneira simplista, com poucos parâmetros característicos da população. Ele assume uma distribuição normal dos dados, mostrando-se ineficiente para populações com alta variância e assimetria.

R é calculado de maneira a ser adimensional, tornando-se invariante a transformações de unidade, através da fórmula:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right)$$

A significância de r pode ser testada, determinando a robustez da tendência linear calculada por r:

$$p_r = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Novamente baseia-se em um nível de significância de 95%, logo se o valor dado por  $p_r$  exceder o limiar de 5% (0.05) a hipótese  $H_0$ , que não há tendência, é aceita.

## 4. RESULTADOS

---

A Figura 10 ilustra as tendências texturais em três seções verticais da camada-guia MU5 (Amy et al., 2007) nos perfis S1, S2 (seções mais proximais) e S7 (seção mais distal), respectivamente. Os gráficos à direita do perfil vertical, construídos através do *software* estatístico R, representam a variação vertical dos parâmetros característicos dos grãos nas amostras mensuradas. No gráfico central encontram-se os percentis de 5%, 50% e 95% das populações de grãos, ou seja, as granulometrias representativas dessas porcentagens dentro do conjunto de medidas de cada amostra. Na extrema direita, apresenta-se o gráfico do desvio-padrão de cada amostra, que na prática caracteriza o grau de seleção das mesmas. Nota-se que o desvio-padrão é calculado na escala phi ( $\phi$ ), significando que valores pequenos caracterizam populações bem selecionadas e valores elevados, populações pobremente selecionadas.

A camada MU5 na seção S1 mostra uma tendência geral de gradação normal, marcante na fração grossa (D95), mas pouco evidenciada nos outros percentis. Na porção basal nota-se ainda uma leve gradação inversa até a altura de 8 m, presente somente no D95. O desvio-padrão da camada nesta seção aponta uma tendência bem definida de decréscimo em direção ao topo, significando que as amostras se tornam mais bem selecionadas neste sentido.

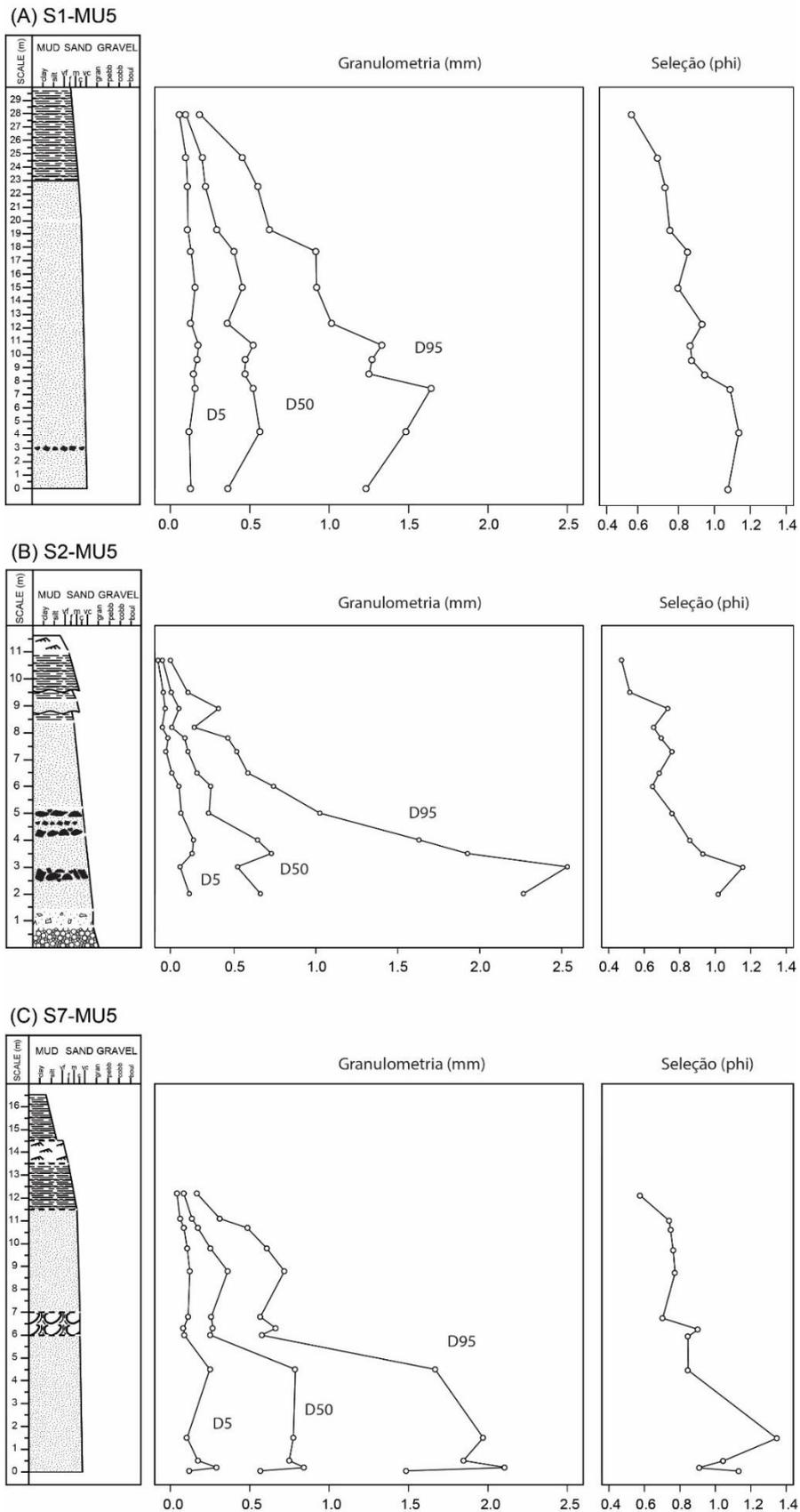


Figura 10 Variação vertical da granulometria e grau de seleção da camada-guia MU5 nas seções 1, 2 e 7 (A, B e C, respectivamente; perfis colunares à esquerda), com os percentis de 5% (D5), 50% (D50) e 95% (D95) das amostras analisadas.

A mesma gradação normal pode ser observada na seção S2, bem marcada também na mediana (D50), com algumas flutuações. Na base a granulometria é mais grossa do que aquela vista na seção PC1, especialmente nos valores do D95, e não se observa um intervalo com gradação inversa. Salvo algumas flutuações, a seleção mostra a mesma tendência de aumento em direção ao topo da camada.

Na seção S7, a camada apresenta uma tendência geral semelhante às outras seções, desta vez com flutuações mais pronunciadas. Destaca-se a presença de uma forte quebra de granulometria aos seis metros de altura, onde a mediana da população abruptamente diminui de areia grossa para areia fina. Esta quebra coincide no perfil com o intervalo em que são observadas estruturas de escape de fluidos. A seleção apresenta a mesma tendência observada nas outras seções, de incremento em direção ao topo, com algumas flutuações. Não se observa uma clara resposta da seleção em relação ao nível de estruturas de escape de fluidos, como constatado para a granulometria.

Os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall calculados para a camada MU5 nas seções analisadas estão apresentados nas Tabelas X e Y, sendo a primeira em relação à camada total e a outra, levando-se em conta somente a porção maciça desta. Este teste teve como objetivo a comprovação estatística da presença de uma tendência, bem como a robustez deste dado. Dois parâmetros foram calculados para cada uma das populações:  $\tau$  (tau) e  $p$ , sendo que o primeiro afere a presença de uma tendência e o segundo, a significância do dado. O valor de  $\tau$  varia entre 1 e -1, sendo que estes extremos significam, respectivamente, uma tendência fortemente positiva ou negativa. O limite do valor de  $p$  é dado pelo complemento do nível de confiança atribuído ao dado. Comumente se trabalha com um nível de confiança de 95%, logo o valor máximo de  $p$  é estabelecido em 5% (0.05). Sempre que esta grandeza é excedida, conclui-se que o valor dado por  $\tau$  não satisfaz as condições impostas pelo nível de confiança estabelecido.

A Tabela 2 mostra os dados para a camada total, calculados a partir da população completa de medições para a camada MU5 em cada seção. Foram testadas as tendências para a granulometria, D5, D50 e D95, e para a seleção (SD).

Tabela 2 Resultados do teste de correlação de Mann-Kendall para as camadas totais.

<i>Camada</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
S1 MU5	<b>-0.872</b> <b>P&lt;0.001</b>	<b>-0.442</b> <b>P=0.043</b>	<b>-0.667</b> <b>P=0.001</b>	<b>-0.769</b> <b>P=0.003</b>
S2 MU5	<b>-0.718</b> <b>P&lt;0.001</b>	<b>-0.769</b> <b>P&lt;0.001</b>	<b>-0.871</b> <b>P&lt;0.001</b>	<b>-0.948</b> <b>P&lt;0.001</b>
S7 MU5	<b>-0.718</b> <b>P&lt;0.001</b>	<b>-0.564</b> <b>P=0.006</b>	<b>-0.684</b> <b>P=0.001</b>	<b>-0.717</b> <b>P=0.002</b>

Nota-se que todas as tendências apresentam valor de  $\tau$  negativo, implicado em uma tendência negativa compatível com aquela observada nos gráficos da Figura 10. A seleção aqui também mostra uma tendência negativa, já que a diminuição do desvio-padrão reflete o aumento da seleção em direção ao topo. Todas as tendências analisadas apresentaram valores inferiores a 5% (0.05) para  $p$ , indicando que o valor de  $\tau$  é robusto e satisfaz a condição do nível de confiança.

A Tabela 3 expressa os valores calculados pelo teste apenas para as porções maciças da camada MU5 nas diferentes seções. Os parâmetros testados foram, novamente, D5, D50 e D95, para a granulometria; e SD, para a seleção.

Tabela 3 Resultados do teste de correlação de Mann-Kendall para as porções maciças.

<i>Camada</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
S1 MU5	<b>-0.786</b> <b>P=0.009</b>	0.074 P=0.9	-0.422 P=0.107	<b>-0.714</b> <b>P=0.018</b>
S2 MU5	<b>-0.714</b> <b>P=0.018</b>	-0.571 P=0.063	<b>-0.714</b> <b>P=0.018</b>	<b>-0.929</b> <b>P=0.002</b>
S7 MU5	<b>-0.556</b> <b>P=0.047</b>	-0.278 P=0.34	-0.449 P=0.087	-0.5 P=0.076

Existe uma grande discrepância nos dados, quando comparados com aqueles da Tabela 2. Os valores para as tendências de seleção continuam dentro dos mesmos limites, corroborando a existência de uma tendência negativa significativa mesmo na porção maciça da camada. As tendências granulométricas, entretanto, apresentam uma resposta diferente, pois nem sempre se pôde validar a tendência observada. Apesar do parâmetro  $\tau$  mostrar tendências significativas nas amostras, a medida de  $p$  invalida parte dessas tendências. Nas populações da fração fina (D5), os valores de  $p$  excederam em todas as seções o limite estabelecido (5%), chegando a 90% (0.9) na seção S1, onde  $\tau$  exibe valor positivo. A mediana mostrou apenas uma medida confiável na seção S2, e nas outras o teste para  $p$  extrapolou o limite estabelecido. A fração grossa foi aquela que melhor resposta obteve no teste, duas medidas (seções S1 e S2) exibiram valores suficientemente robustos para corroborar a existência de uma tendência.

O teste de correlação de Pearson foi realizado a fim de comparar os resultados. De maneira similar ao teste de Mann-Kendall, o teste de correlação de Pearson classifica o tipo de correlação com base no parâmetro  $r$ , que, assim como tau, varia entre +1 e -1. Para valores de  $r$  próximos a +1 a tendência é dita extremamente positiva, e para -1, extremamente negativa. Associado a este teste, calculou-se também a variável  $p$ , análoga ao teste de Mann-Kendall, que verifica a validade do teste.

A Tabela 4 mostra os resultados do teste de correlação de Pearson para a camada total nas diferentes seções. Observa-se que os valores de  $r$  assumem sempre valores negativos, implicando em tendências negativas em todas as populações. Apenas na seção S1 os valores de  $p$  mostraram-se acima do limite proposto para a mediana e para a fração grossa da população. Nota-se que nas demais seções as tendências foram totalmente comprovadas pelo teste.

Tabela 4 Resultados do teste de correlação de Pearson para a camada total.

<i>Camada</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
S1 MU5	<b>-0.94</b> <b>P=0</b>	-0.65 P=0.05	-0.8 P=0.08	<b>-0.91</b> <b>P=0.02</b>
S2 MU5	<b>-0.89</b> <b>P=0</b>	<b>-0.92</b> <b>P=0</b>	<b>-0.94</b> <b>P=0</b>	<b>-0.94</b> <b>P=0</b>
S7 MU5	<b>-0.83</b> <b>P=0</b>	<b>-0.7</b> <b>P=0</b>	<b>-0.9</b> <b>P=0</b>	<b>-0.92</b> <b>P=0</b>

Os valores calculados no teste de correlação de Pearson para a porção maciça da camada estão apresentados na Tabela 5. A tendência negativa observada na seleção pôde ser comprovada na porção maciça em todas as seções. Na granulometria, a tendência da fração fina (D5), apesar de se manter negativa, foi refutada devido aos valores calculados para p excederem o limite. Também não obtiveram comprovação as tendências na mediana para as seções S1 e S2 (proximais) e para a fração grossa (D95) na seção S1, mesmo com valores de r mostrando uma tendência negativa consistente.

Tabela 5 Resultados do teste de correlação de Pearson para a porção maciça.

<i>Camada</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
S1 MU5	<b>-0.87</b> <b>P=0</b>	-0.1 P=0.79	-0.42 P=0.32	-0.76 P=0.05
S2 MU5	<b>-0.84</b> <b>P=0.04</b>	-0.8 P=0.1	-0.88 P=0.06	<b>-0.96</b> <b>P=0.01</b>
S7 MU5	<b>-0.7</b> <b>P=0.02</b>	-0.43 P=0.15	<b>-0.78</b> <b>P=0.04</b>	<b>-0.85</b> <b>P=0.01</b>

---

## 5. DISCUSSÃO

---

### 5.1 Gradação Normal em Arenitos

A tendência geral observada na camada MU5 nas diferentes seções e quantificada nos testes de tendência foi a de gradação normal, caracterizada por um decréscimo da granulometria em direção ao topo da camada. A gradação normal em arenitos pode ser interpretada como reflexo do afinamento do fluxo em direção à cauda (*tailward fining of the flow*) (Kneller & Buckee, 2000; Kuenen & Menard, 1952) ou então segregação de grãos durante a sedimentação da carga suspensa (Lowe, 1982). A deposição de grãos mais grossos através da camada basal não-turbulenta do fluxo também pode levar à formação de gradação normal das frações grossas (Marr et al., 2001). Em contrapartida, gradação normal bem desenvolvida nas porções superiores do depósito pode refletir uma estrutura longitudinal do fluxo (Sylvester & Lowe, 2004).

### 5.2 Intervalos Maciços

A presença de porções maciças, isto é, sem estruturas trativas, não é incomum em sucessões clásticas de águas profundas (Dzulynski et al., 1959; Haines et al., 2001), apesar de raramente serem documentadas de maneira quantitativa. Os resultados apresentados pelos testes neste trabalho quantificaram esses intervalos

maciços para a camada-guia em estudo, mostrando a tendência geral de ausência de gradação nas frações finas e presença de gradação normal nas frações grossas (Middleton, 1967).

Um das teorias existentes para a formação de intervalos maciços em arenitos (Kneller & Branney, 1995; Kneller, 1995) afirma que eles se desenvolvem pela ação de correntes de turbidez de alta densidade duradouras (*sustained high-density turbidity currents*), cuja porção inferior é dominada por interações intergranulares e sedimentação impedida (*hindered settling*). Esta porção da corrente está sujeita à deposição contínua na sua base, continuamente reabastecida por grãos oriundos da porção superior do fluxo em processo de assentamento, de modo que uma zona de sedimento liquefeito é sustentada entre o fluxo e a camada estática.

Entretanto, estudos experimentais (Middleton & Neal, 1989; Vrolijk & Southard, 1997) sugerem que camadas espessas e sem gradação são depositadas por fluxos com as mais altas concentrações de sedimento em áreas onde as taxas de sedimentação são maiores. Outros estudos observaram semelhanças na estrutura de depósitos turbidíticos com resultados experimentais de fluxos gravitacionais descritos como fluxos fracamente coerentes (Marr et al., 2001). Tais autores propõem que intervalos maciços são depositados por fluxos que possuíam cabeças turbulentas, mas corpos fracamente coesivos a parcialmente laminares durante o estágio de deposição (Sylvester & Lowe, 2004). As fracas tendências verticais apresentadas por estes depósitos, como incremento da seleção e gradação normal da fração grossa, sugerem que a turbulência era mais intensa durante a fase principal de transporte do que após o início da deposição.

### **5.3 Gradação Inversa**

Apesar da presença de gradação inversa ter sido documentada em camadas relativamente espessas de arenitos turbidíticos (Sylvester & Lowe, 2004), não foram identificadas tendências gerais indicativas desse tipo de gradação na camada em estudo. Entretanto, observou-se um intervalo basal com gradação inversa em todas as seções, mais pronunciada na fração grossa. Na seção S1 esse intervalo chega a

8 m de espessura; nas outras seções ele é moderadamente pronunciado, com cerca de 1 m de espessura na seção S2 e 0,5 m na seção S7.

Uma possível explicação para a presença de gradação inversa nos arenitos baseia-se no aprisionamento de finos, levando em conta mudanças na concentração do fluxo e as taxas de sedimentação associadas (Sylvester & Lowe, 2004). Correntes de turbidez normalmente apresentam rápida deposição de areia (Lowe, 1982), com taxas de sedimentação que instantaneamente atingem um máximo e então diminuem com o tempo (J. R. L. Allen, 1991; Middleton, 1993). Quando a deposição começa, as taxas de deposição da carga suspensa (*suspended-load fallout rates*) atingem valores máximos, impedindo o desenvolvimento de processos trativos (Sylvester & Lowe, 2004). A deposição prossegue conduzida pela capacidade do fluxo, e uma fração significativa de sedimentos finos fica aprisionada no depósito. À medida que a taxa de deposição diminui, a porção de finos aprisionados também diminui. Este modelo pressupõe gradação inversa na fração fina e incremento da seleção em direção ao topo como característicos de fluxos turbidíticos colapsantes. Não existem razões para esses padrões obrigatoriamente ocorrerem em depósitos de fluxos contínuos (*sustained-flow deposits*) (Sylvester & Lowe, 2004). Entretanto, a distinção entre fluxos colapsantes e fluxos contínuos pode ser problemática no caso de espessas camadas de arenitos.

Por outro lado, a gradação inversa apenas na base de arenitos turbidíticos não é incomum (Baas, 2004; Gonzalez-Bonorino & Middleton, 1976; Hand, 1997; Talling et al., 2007) em diferentes escalas, milimétricas a decimétricas. Um dos modelos existentes para a presença de gradação inversa basal sugere que pouco antes do fluxo parar por completo, desenvolvem-se condições de fluxo de grãos e/ou fluxo de sedimento fluidizado, e o cisalhamento (*shearing*) a partir desses mecanismos na porção inferior do fluxo forma gradação inversa (Gonzalez-Bonorino & Middleton, 1976).

Frequentemente a presença da gradação inversa basal é considerada evidência de uma aceleração (*waxing*) do fluxo (Kneller & Branney, 1995; Mulder & Alexander, 2001; Mulder et al., 2003); por outro lado pode-se associar à segregação lateral de partículas pelo fluxo (Hand, 1997). Em estudo experimental apontou-se que

a presença de gradação inversa basal se relaciona preferencialmente a processos de seleção mecânica que ocorrem dentro de uma camada cisalhante de grãos que tenha persistido na base do fluxo durante os estágios iniciais de deposição (Sumner et al., 2008).

#### 5.4 Seleção

Diversos estudos quantitativos de texturas de turbiditos mostraram que, mesmo quando a mediana da granulometria não apresenta gradação (Middleton, 1962) ou gradação inverso-normal está presente (Middleton, 1967), a seleção aumenta em direção ao topo da camada.

A tendência geral observada em relação à seleção das amostras foi de um incremento em direção ao topo, mesmo quando foram consideradas apenas as porções maciças. Tal incremento na seleção, associado com gradação normal e inverso-normal nos depósitos pode ser interpretada em termos da importância da taxa de deposição da carga suspensa e velocidade do fluxo durante a sedimentação de uma corrente de turbidez colapsante (*collapsing turbidity current*) (Sylvester & Lowe, 2004). Inicialmente a taxa de deposição da carga suspensa é alta, possibilitando o aprisionamento de finos na porção basal da camada. À medida que o fluxo evolui e as taxas de deposição diminuem, e o fluxo acaba por fracionar os finos, gerando, assim, parcelas mais bem selecionadas de sedimento.

#### 5.5 Quebras de Granulometria

Dois tipos de quebras granulométricas nas frações arenosas de depósitos turbidíticos foram descritas na literatura (Talling et al., 2012). O primeiro tipo refere-se às duas quebras: uma que separa, da base para o topo, arenitos maciços ou com laminação plano-paralela, de arenitos com laminação cruzada, ou laminação plano-paralela, ou lentes arenosas descontínuas com intraclastos lamosos; e outra que separa estes mesmos arenitos laminados ou lenticulares de uma porção sobreposta de arenitos com marcas onduladas (Bouma, 1962; Lowe, 1982; Sylvester & Lowe, 2004). O segundo tipo relaciona-se com a quebra que separa, da base para o topo, arenitos maciços ou com laminação plano-paralela de arenitos com marcas onduladas. Ambos os tipos acima apresentados marcam uma mudança abrupta de

sedimentação para *by-pass* de sedimentos (com erosão ou deposição de sedimentos retrabalhados).

A quebra de granulometria registrada na seção S7 difere dos tipos descritos na literatura por se encontrar dentro do intervalo basal maciço do depósito. Não está clara a relação entre essa quebra e a presença de estruturas de escape de fluidos observadas em campo. Provavelmente uma obliteração das estruturas originais presentes na camada tenha ocorrido em função desse escape de fluidos. Observações experimentais (Sumner et al., 2008) ainda sugerem que quebras granulométricas podem resultar de mecanismos de deposição ainda pouco conhecidos (Talling et al., 2012). Alternativamente, as estruturas de fluidização podem estar marcando uma superfície de amalgamento no espesso pacote arenoso.

## 5.6 Correlação de Tendências

Quando as tendências observadas na camada MU5 são correlacionadas num perfil de regiões proximais (seções S1 e S2) para distais (seção S7) notam-se alguns padrões:

- A fração fina (D5) não é bem gradada nas seções mais proximais (especialmente S1) em relação à seção S7 (Figura 11), o que sugere taxas de sedimentação mais altas na área proximal.
- A tendência vertical na seleção apresenta-se mais bem definida (Figura 12), ou seja, valores de tau maiores, na região proximal da camada.
- As frações grossas mostram-se melhor gradadas, especialmente no intervalo maciço da camada, nas porções proximais em relação às distais (Figura 13).

A distribuição das tendências no eixo proximal-distal da bacia sugere padrões contrastantes entre as frações finas e grossas da granulometria. A uniformidade espacial do comportamento das tendências da fração fina na porção maciça, ou seja, a ausência de gradação destas porções para D5, sugere que a deposição foi controlada pela capacidade do fluxo (Hiscott, 1994). Uma vez que o fluxo perde capacidade, a carga é sedimentada como um todo, sem tempo para que os grãos menores sejam selecionados. Evidências da relevância da capacidade do fluxo em

processos deposicionais de correntes de turbidez já foram relatadas em tendências verticais (Sylvester & Lowe, 2004), entretanto correlacionado à presença de gradação inversa na fração fina, que foi interpretada como ação de aprisionamento de finos.

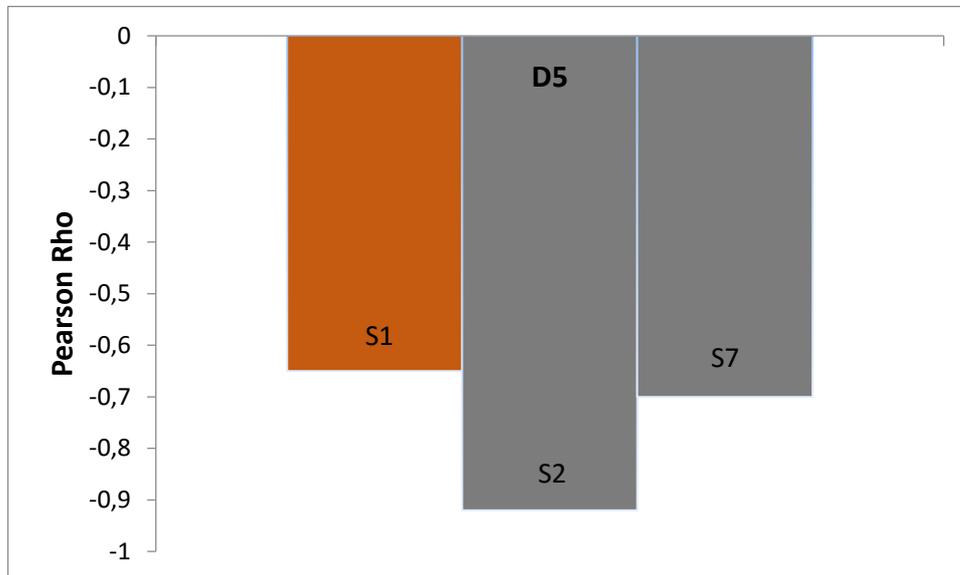


Figura 11 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Paerson para a fração fina (D5) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes.

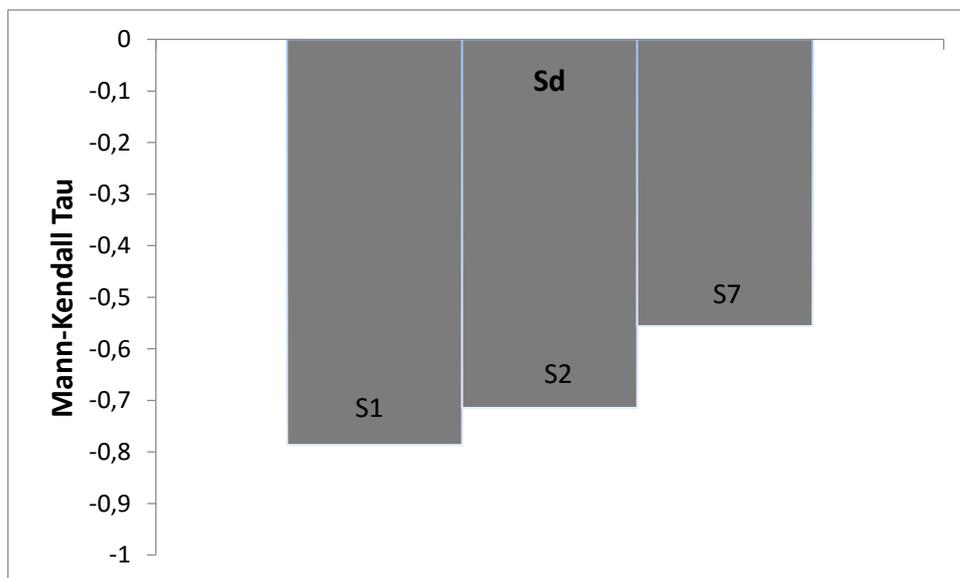


Figura 12 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Mann-Kendall para a seleção (SD) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes

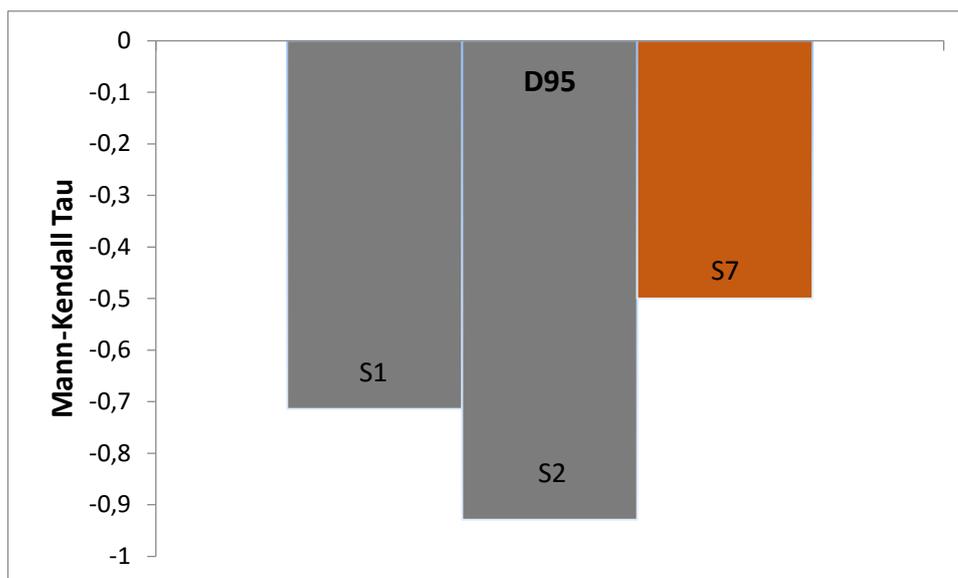


Figura 13 Gráfico de barras mostrando os resultados do Teste de Mann-Kendall para a fração grossa (D95) nas diferentes seções; barras em cinza para valores significantes

Resultados experimentais (McCaffrey et al., 2003) apontam para uma sedimentação controlada pela capacidade do fluxo, que seria responsável pela deposição de arenitos maciços predominantemente nas porções proximais do fluxo, enquanto na porção distal, a sedimentação seria controlada pela competência do fluxo, logo a presença de estruturas trativas. Este trabalho corrobora essas tendências e corrobora a ideia dos autores acima mencionados de que estes processos também são responsáveis pelo desenvolvimento de gradação na fração grossa da granulometria.

Dessa forma, a análise granulométrica sugere que o padrão de variação em arenitos turbidíticos é mais complexo do que o esperado, apesar das tendências predominantes de gradação normal e incremento da seleção. O desenvolvimento de gradação inversa ainda é motivo de debate, e existe a possibilidade de que um conjunto processos em um determinado contexto seja responsável pela sua presença em turbiditos.

## 6. CONCLUSÕES

---

A análise das tendências texturais nos arenitos turbidíticos da Formação Grès d'Annot na Sub-bacia de Peira Cava permitiu concluir que:

- Estes arenitos apresentam tendências texturais claras e estatisticamente mensuráveis. De modo geral observa-se gradação normal da fração grosseira e mediana da granulometria e um aumento da seleção em direção ao topo da camada.
- Espessos intervalos de arenitos maciços não são gradados nas frações finas, mas apresentam gradação nas frações grossas.
- Existe uma diferença no padrão gradacional entre as frações finas e grossas das camadas estudadas. A gradação normal na fração grossa se expressa melhor na parte proximal da bacia; em contraste, a fração fina mostra um comportamento oposto.
- A sedimentação foi controlada pela perda de capacidade do fluxo, e não pela desaceleração do mesmo.
- Tendências verticais da seleção apresentam-se mais bem definidas na porção proximal da bacia.

As propriedades texturais dos depósitos turbidíticos descritos neste trabalho influenciam fortemente na distribuição da porosidade e permeabilidade em um reservatório de hidrocarbonetos. A presença dos padrões gerais de aumento de seleção e ausência de gradação da fração fina em arenitos turbidíticos pode ser um elemento característico destas rochas, como já documentado (Sylvester & Lowe, 2004). A presença de espessas camadas sem gradação aparente representa características de contextos deposicionais mais proximais, onde as taxas de sedimentação inicialmente são altas, mas rapidamente diminuem. Tais características podem ser utilizadas na predição de depósitos arenosos a jusante.

Futuros estudos poderão se aprofundar na natureza e controle da quebra de granulometria observada no intervalo maciço da seção S7, cujo significado não está claro.

---

## REFERÊNCIAS

---

- Allen, J. R. L. 1991. The Bouma division A and the possible duration of turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 291–295.
- Amy, L. A., Kneller, B. C., & McCaffrey, W. D. 2000. Evaluating the Links Between Turbidite Characteristics and Gross System Architecture : Upscaling Insights from the Turbidite Sheet-System of Peira Cava , SE France. In *GCSSEPM Foundation 20th Annual Research Conference Deep-Water Reservoirs of the World*.
- Amy, L. A., Kneller, B. C., & McCaffrey, W. D. 2007. Facies architecture of the Grès de Peira Cava, SE France: landward stacking patterns in ponded turbiditic basins. *Journal of the Geological Society London*, 164: 143–162.
- Amy, L. A., Peachey, S. A., Gardiner, A. R., Pickup, G. E., Mackay, E., & Stephen, K. D. 2013. Recovery efficiency from a turbidite sheet system: numerical simulation of waterflooding using outcrop-based geological models. *Petroleum Geoscience*, 19(2): 123–138.
- Apps, G. M. 1985. The Grès d'Annot foreland basin, Haute Provence: the control of turbidite deposition by structurally induced basin floor topography. In *6th European Regional Meeting of Sedimentology IAS Lleida* (p.18–21).
- Apps, G. M. 1987. *Evolution of the Grès d'Annot Basin, SW Alps*. University of Liverpool.
- Baas, J. H. 2004. Conditions of formation of massive turbiditic sandstones by primary depositional processes. *Sedimentary Geology*, 166: 293–310.
- Bouma, A. H. 1962. *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*. Elsevier Publ. University of Utrecht.
- Bouma, A. H. 1990. Clastic depositional styles and reservoir potential of Mediterranean basins. *AAPG Bulletin*, (74): 532–546.

- Bouma, A. H., & Coleman, J. M. 1985. Peira Cava turbidite system, France. In A. H. Bouma, W. R. Normark, & N. E. Barnes (Eds.), *Submarine Fans and Related Turbidite Systems* (p.217–222). New York: Springer.
- Davies, O. L., & Goldsmith, P. L. 1977. *Statistical Methods in Research and Production*. London: Longman.
- Dzulynski, S., Ksiazkiewicz, M., & Kuenen, P. H. 1959. Turbidites in Flysch of the Polish Carpathian mountains. *Geological Society of America Bulletin*, 70: 1089–1118.
- Elliot, T., Apps, G. M., Davies, H., Evans, M., Ghibaudo, G., & Graham, R. H. 1985. Field excursion B: a structural and sedimentological traverse through the Tertiary foreland basin of the external Alps of South-east France. In P. A. Allen & P. Homewood (Eds.), *Field Excursion Guide Book, International Association of Sedimentologists, Meeting on Foreland Basins* (p.39–73).
- Faure-Muret, A., Kuenen, P. H., Lanteaume, M., & Fallot, P. 1956. Sur les flyschs des Alpes-Maritimes Françaises et Italiennes. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences, Paris*, 243: 1697–1701.
- Gonzalez-Bonorino, G., & Middleton, G. V. 1976. A Devonian submarine fan in western Argentina. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46(1): 56–69.
- Haines, P. W., Jago, J. B., & Gum, J. C. 2001. Turbidite deposition in the Cambrian Kanmantoo Group, South Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 465–478.
- Hand, B. M. 1997. Inverse grading resulting from coarse-sediment transport lag. *Journal of Sedimentary Research*, 67: 124–129.
- Hilton, V. C. 1994. *Architecture of deep-marine confined sandstone bodies, Eocene-Oligocene Grès d'Annot Formation SE France*. University of Leicester.
- Hilton, V. C., & Pickering, K. T. 1995. The Montagne de Chalufy turbidite onlap, Eocene-Oligocene turbidite sheet system, Hautes Provence, SE France. In K. T. Pickering, R. N. Hiscott, N. H. Kenyon, F. R. Lucchi, & R. D. A. Smith (Eds.), *Atlas of Deep Water Environments* (p.236–241). Chapman and Hall.
- Hiscott, R. N. 1994. Loss of capacity, not competence, as the fundamental process governing deposition from turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 64(2a): 209–214.
- Johnson, M. R. 1994. Thin section grain size analysis revisited. *Sedimentology*, 41(5): 985–999.
- Joseph, P., & Lomas, S. a. 2004. Deep-water sedimentation in the Alpine Foreland Basin of SE France: New perspectives on the Gres d'Annot and related systems - an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 221(1): 1–16.
- Kendall, M. G. 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30: 81–93.
- Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods* (4th editio.). London: Charles Griffin.
- Kneller, B. C. 1995. Beyond the turbidite paradigm; physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In A. J. Hartley & D. J. Prosser (Eds.), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems* (p.31–49).

- Geological Society Special Publications.
- Kneller, B. C. 2013. *BP ETAP - Deepwater Field Workshop Guide - Peira Cava & Annot*. University of Aberdeen.
- Kneller, B. C., & Branney, M. J. 1995. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive. *Sedimentology*, 42: 607–616.
- Kneller, B. C., & Buckee, C. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, 47: 62–94.
- Kuenen, P. H., Faure-Muret, A., Lanteaume, M., & Fallot, P. 1957. Observations sur les Flyschs des Alpes Maritimes françaises et italiennes. *Bulletin de La Société Géologique de France*, 6 (VII): 4–26.
- Kuenen, P. H., & Menard, H. W. 1952. Turbidity currents, graded and non-graded deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 22: 83–96.
- Kuenen, P. H., & Migliorini, C. I. 1950. Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding. *The Journal of Geology*, 58(2): 91–127.
- Lanteaume, M., Beaudoin, B., & Campredon, R. 1967. *Figures sédimentaires du Flysch "Grès d'Annot" du synclinal de Peira Cava*. Paris: CNRS ed.
- Laval, A., Cremer, M., Beghin, P., & Ravenne, C. 1988. Density surges: two-dimensional experiments. *Sedimentology*, 35: 73–84.
- Lowe, D. R. 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52(1): 279–297.
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13: 245–259.
- Marr, J. G., Harff, P. A., Shanmugam, G., & Parker, G. 2001. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures. *Geological Society of America Bulletin*, 113: 1377–1386.
- McCaffrey, W. D., Choux, C. M., Baas, J. H., & Haughton, P. D. W. 2003. Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain size stratification within experimental particulate gravity currents. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6-8): 851–860.
- McCaffrey, W. D., & Kneller, B. C. 2001. Process controls on the development of stratigraphic trap potential on the margins of confined turbidite systems, and aids to reservoir evaluation. *AAPG Bulletin*, 85: 971–988.
- Middleton, G. V. 1962. Size and sphericity of quartz grains in two turbidite formations. *Journal of Sedimentary Petrology*, 32(4): 725–742.
- Middleton, G. V. 1967. Experiments on Density and Turbidity Currents: III. Deposition of Sediment. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 4(3): 475–505.
- Middleton, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 21: 89–114.
- Middleton, G. V., & Neal, W. J. 1989. Experiments on the thickness of beds deposited

- by turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59: 297–307.
- Mougin, F. 1978. *Contribution a l'étude des sédiments tertiaires de la partie orientale du synclinal d'Annot*. Grenoble.
- Mulder, T., & Alexander, J. A. N. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48: 269–299.
- Mulder, T., Syvitski, J. P. M., Migeon, S., Faugères, J.-C., & Savoye, B. 2003. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 861–882.
- Nilsen, T. H. 2007. *Atlas of deep-water outcrops*. AAPG The American Association of Petroleum Geologists ; Shell Exploration & Production.
- Pickering, K. T., & Hilton, V. C. 1998. *Turbidite Systems of SE France*. London: Vallis Press.
- Pierce, J. W., & Graus, R. R. 1981. Use and misuses of the phi-scale. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 1348–1350.
- Ravenne, C., Vially, R., Riche, P., & Tremolieres, P. 1987. Sédimentation et tectonique dans le bassin marin éocène supérieur-oligocène des Alpes de Sud. *Revue de L'Institut Français Du Pétrole*, 42: 529–553.
- Shanmugam, G. 2002. Ten turbidite myths. *Earth-Science Reviews*, 58: 311–341.
- Stanley, D. J. 1961. *Etudes sédimentologiques des Grès d'Annot et leurs équivalents latéraux*. Université de Grenoble.
- Stanley, D. J. 1993. Model for turbidite-to-contourite continuum and multiple process transport in deep marine settings: examples in the rock record. *Sedimentary Geology*, 82: 241–255.
- Stanley, D. J., & Mutti, E. 1978. Sedimentological evidence for an emerged land mass in the Ligurian Sea during the Paleocene. *Nature*, 218: 32–36.
- Sumner, E. J., Amy, L. A., & Talling, P. J. 2008. Deposit Structure and Processes of Sand Deposition from Decelerating Sediment Suspensions. *Journal of Sedimentary Research*, 78(8): 529–547.
- Sylvester, Z., & Lowe, D. R. 2004. Textural trends in turbidites and slurry beds from the Oligocene flysch of the East Carpathians, Romania. *Sedimentology*, 51(5): 945–972.
- Talling, P. J., Amy, L. A., & Wynn, R. B. 2007. New insight into the evolution of large-volume turbidity currents: comparison of turbidite shape and previous modelling results. *Sedimentology*, 54: 737–769.
- Talling, P. J., Masson, D. G., Sumner, E. J., & Malgesini, G. 2012. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59(7): 1937–2003.
- Vrolijk, P. J., & Southard, J. B. 1997. Experiments on rapid deposition of sand from high-velocity flows. *Geoscience Canada*, 24: 45–54.
- Weimer, P., & Pettingill, H. S. 2007. Deep-water Exploration and Production: A Global Overview. In T. H. Nilsen, R. D. Shew, G. S. Steffens, & J. R. J. Studlick (Eds.),

---

*Atlas of deep-water outcrops: AAPG Studies in Geology 56.*

## APÊNDICES

---

### APÊNDICE A

Tabelas de dados granulométricos da camada MU5

*Tabela de dados estatísticos S1MU5*

<i>Altura a partir da base (m)</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
0	1.076	0.129	0.361	1.233
4	1.136	0.119	0.563	1.481
7	1.087	0.155	0.520	1.642
8	0.946	0.146	0.465	1.253
9	0.875	0.167	0.474	1.270
10	0.865	0.177	0.522	1.330
11.5	0.933	0.130	0.358	1.015
14	0.798	0.155	0.454	0.919
16.5	0.854	0.130	0.399	0.917
18	0.751	0.110	0.293	0.624
21	0.726	0.107	0.220	0.546
23	0.685	0.099	0.197	0.455
26	0.541	0.055	0.098	0.189

Tabela de dados estatísticos S2MU5

<i>Altura a partir da base (m)</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
2	1.018	0.228	0.662	2.267
3	1.155	0.172	0.519	2.536
3.5	0.931	0.246	0.728	1.925
4	0.856	0.253	0.642	1.632
5	0.760	0.179	0.349	1.024
6	0.645	0.166	0.361	0.740
6.5	0.685	0.122	0.275	0.585
7.3	0.756	0.087	0.220	0.517
7.8	0.694	0.098	0.199	0.464
8.2	0.653	0.060	0.120	0.257
8.9	0.732	0.081	0.165	0.407
9.5	0.519	0.069	0.117	0.218
10.7	0.472	0.037	0.066	0.113

Tabela de dados estatísticos S7MU5

<i>Altura a partir da base</i>	<i>SD</i>	<i>D5</i>	<i>D50</i>	<i>D95</i>
0.05	1.133	0.118	0.565	1.485
0.2	0.904	0.295	0.844	2.112
0.5	1.044	0.172	0.748	1.845
1.5	1.346	0.105	0.775	1.970
4.5	0.847	0.248	0.786	1.667
6.0	0.846	0.089	0.253	0.572
6.3	0.905	0.083	0.268	0.664
6.8	0.703	0.111	0.257	0.567
8.8	0.773	0.123	0.362	0.718
9.8	0.762	0.106	0.253	0.607
10.7	0.747	0.085	0.173	0.483
11.1	0.740	0.060	0.136	0.311
12.2	0.577	0.042	0.083	0.166