

# CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE DELTAS DOMINADOS POR RIOS SIMULADOS EXPERIMENTALMENTE SOB VARIAÇÃO DE CONDIÇÕES DE APORTE FLUVIAL E NÍVEL DE BASE

Rafael MANICA<sup>1</sup> & Ana Luiza de Oliveira BORGES<sup>2</sup>

(1) Professor Adjunto - Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Av. Bento Gonçalves, 9500. Cep 91501-970. Cx. Postal: 15029, Porto Alegre, Brasil. Endereço eletrônico: manica@iph.ufrgs.br.

(2) Professora Titular - Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Av. Bento Gonçalves, 9500. Cep 91501-970. Cx. Postal: 15029, Porto Alegre, Brasil. Endereço eletrônico: alborges@iph.ufrgs.br.

Introdução  
Aparato e Metodologia experimental  
Ensaio Executados  
Resultados  
    Forma do Depósito  
    Relações de progradação e simetria do depósito formado  
    Determinação do depocentro do depósito  
    Relação da Progradação/Compensação lateral/Agradação com os parâmetros médios de entrada do ensaio  
Discussão dos resultados e implicações na transferência de sedimento a bacia  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências

**Resumo** - Este trabalho visa caracterizar geometricamente depósito deltaico gerado em laboratório a partir de diversas condições de aporte fluvial (vazão e suprimento de sedimentos), bem como de alteração de nível de base da bacia, buscando entender quais fatores são mais significativos na formação dos deltas e como se dá o processo sedimentar (progradação, compensação lateral e retro/agradação). Para cumprir os objetivos propostos no trabalho foram realizadas quatro séries de experimentos em tanque tridimensional, buscando controlar e variar os seguintes parâmetros de entrada: vazão, concentração e nível de base. Ao todo, 150 horas de simulação foram realizadas. Os resultados mostraram que a diminuição do nível de base e da concentração foram os principais fatores de mudança de geometria/forma dos deltas formados. O primeiro por criar mais espaço para a o avanço da frente deltaica, e o segundo, por provocar processos erosivos junto à planície fluvial e deltaica, transferindo esses sedimentos à jusante. Já a vazão fluvial também é importante, mas está mais condicionada à alta intensidade (capacidade de transporte) e curta duração (eventos catastróficos). A implicação dos resultados no estado da arte é discutida.

**Palavras chaves:** aporte fluvial, morfologia de deltas, experimentos tridimensionais.

**Abstract** - This work aims to characterize geometrically the deltaic deposit generated at laboratory. Different fluvial conditions (sediment supply and discharge) and water-level change were varied in order to understand which parameters are most significant on sedimentary process of deltas (progradation, lateral migration and retro/aggradation). Four series of experiments in 3D-tank were carried out with variable input parameters as follows: flow rate, concentration and water-level base. At total, 150 hours of simulation were performed. Those experiments evidenced that both water-level fall (creating more space for the propagation of the deltaic front) and volumetric concentration decrease (causing erosion along the river and deltaic plain, transferring sediment downstream) were main factors of change in geometry/shape of the deltas. Yet, fluvial discharge plays an important role, but is related to high intensity (capacity of transport) and short duration (catastrophic events). The implications of the results in the state of art are discussed.

**Key-words:** fluvial inflow, delta morphology, three-dimensional experiments.

## INTRODUÇÃO

Em estudos de depósitos sedimentares naturais, a caracterização geométrica dos mais variados elementos do estudo (camadas, volume depositado, tratos de sistemas, etc) é, apesar de difícil, factível de ser realizada. Em alguns casos, esse levantamento é direto (medidas em afloramentos e/ou testemunhos de sondagem, por exemplo); em outros casos, são utilizadas técnicas de medição indireta (sísmica, aerofotogrametria, etc). Em contrapartida, a determinação dos processos sedimentares e as diferentes variáveis envolvidas na formação desses depósitos sedimentares nem sempre é de

fácil determinação. Para esses casos, utilizam-se ferramentas alternativas de estudo, como por exemplo a modelagem experimental, que permite acompanhar detalhadamente e de maneira controlada os parâmetros formadores desses depósitos sedimentares e correlacionar as respostas obtidas em laboratório com o ambiente natural.

No caso de sistemas deltaicos, definidos como "linha de costa formada por rios entrando em corpos d'água (oceanos, mares semifechados, lagos ou lagoas), que fornecem sedimentos mais rapidamente do que eles

podem ser redistribuídos por processos ocorridos nesses corpos” (Bhattacharya, 2006), a situação descrita acima não é diferente. Usualmente, os parâmetros geométricos, tais como comprimento e largura da planície deltaica, frente deltaica e prodelta, bem como a linha de costa, definida como a linha de encontro entre o corpo da água e a frente deltaica, dos deltas naturais são conhecidos (Wright & Coleman, 1973, Einsele, 2000, Muto & Steel, 2004, Porebski & Steel, 2006 e outros), porém as respostas desses sistemas às condições dinâmicas de sua formação (como por exemplo, aporte de rios, mares, ondas) são mais difíceis de acompanhar.

Nos sistemas deltaicos, as suas características geométricas (morfologia externa) e as características internas dos depósitos ( fácies) dependem de diversos fatores, quais sejam: a característica do fluxo do aporte fluvial, tal como vazão, tamanho de grão, relação de concentração com o fluido do corpo receptor; as interações da pluma do rio com os processos marinhos, que podem incluir ondas, marés, tempestades, correntes oceânicas e biogênicas; a posição física do delta na bacia, como a borda da plataforma e o nível de água do corpo receptor; e o grau em que o rio e seus sedimentos derivados são retrabalhados por processos marinhos/lacustres (Bhattacharya, 2006). Nos deltas dominados por rios, o primeiro fator é um dos mais importantes.

Em condições de escala natural, o estudo desses processos se torna, praticamente, inviável. Portanto, um dos caminhos que pode

ser seguido é a construção de modelos físicos, em escala reduzida, que possibilitem a avaliação, sob condições controladas, dos diferentes processos envolvidos na evolução dos sistemas deltaicos dominados tanto por rio como pelo mar. Paola et al (2009) destacam que, em termos gerais, é surpreendente quão pouca atenção é dada por pesquisadores a deltas com relação ao número de motivações convincentes para estudá-los. Entretanto, quando esses estudos em laboratório ocorrem, apesar de todas as simplificações inerentes (especialmente quanto aos fatores de escala), as condições da simulação podem ser facilmente controladas e alteradas, permitindo simular cenários de experimentos que representam condições diversas de causa-efeito, ou seja, de aporte de sedimentos e sua deposição. Além disso, o entendimento dos processos físicos que regulam a formação, a evolução (avanço) e a destruição dos sistemas deltaicos é fundamental para a compreensão de como ocorre a transferência do sedimento gerado no continente (frações areia, silte e argila), que avança sobre a plataforma continental e segue em direção a águas profundas.

Dentro desse contexto, este trabalho visa caracterizar geometricamente o depósito deltaico gerado em laboratório a partir de diversas condições de aporte fluvial, bem como de alteração de nível de base da bacia, buscando entender quais fatores são mais significativos na formação dos deltas e como se dá o processo sedimentar (progradação, compensação lateral e retro/agração).

## APARATO E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

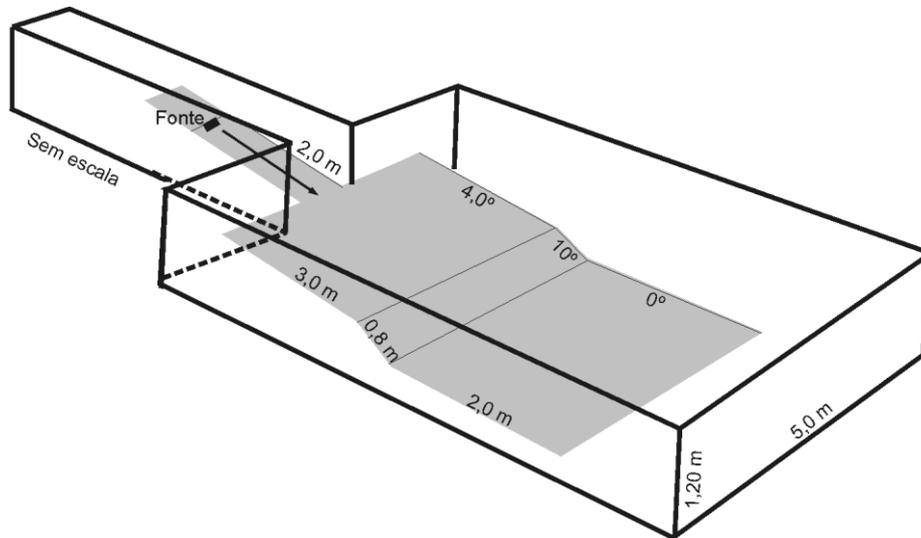
Os experimentos foram realizados nas instalações do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD/IPH/UFRGS) e foi utilizado o tanque Tridimensional de Geometria Simplificada (Manica, 2002 e Del Rey, 2006), o qual foi projetado e construído em alvenaria com fundo fixo e com as seguintes dimensões internas: comprimento total de 13,85 m, sendo que nos primeiros 6,85 m a largura é de 0,96 m (região da calha fluvial) e nos 7,0 m finais a largura passa a ser de 4,66 m (região da plataforma e bacia). A profundidade do canal é de 1,20 m. No seu interior, foram instaladas plataformas metálicas que permitem regular a

declividade do fundo. A figura 1 apresenta o tanque com suas dimensões. Um reservatório auxiliar com capacidade de 5000 litros foi utilizado para a preparação da mistura do ensaio.

O método experimental utilizado nos ensaios foi o de fluxo contínuo, com volume de mistura sendo aportado ao longo de um determinado tempo. Os ensaios utilizaram mistura de sedimentos que era previamente preparada no reservatório auxiliar e agitada para garantir a sua homogeneização. A composição da mistura foi água e carvão mineral (Manica, 2002, Manica et al., 2005, Del

Rey, 2006, Ducker, 2007, entre outros), sendo a relação entre eles de: 20% com diâmetro menor que 0,074 mm; 60% com diâmetro entre 0,074 mm e 0,175 mm; e 20% entre 0,174 mm e 0,300 mm. Uma tubulação com um medidor de vazão e uma válvula automática conectava o reservatório ao tanque. O tanque era completado com água até o nível estabelecido e

a válvula automatizada controlava a vazão de entrada. Ao longo do ensaio, o volume injetado era registrado no medidor de vazão e uma câmera fotográfica digital era posicionada acima do tanque para registrar a evolução do fluxo. Uma calha de drenagem junto ao fundo do tanque retirava o excesso de água causada pelo aporte de mistura.



**Figura 1.** Desenho esquemático do Tanque Tridimensional de Geometria Simplificada

Após o ensaio, o tanque era drenado lentamente para não perturbar o depósito gerado e fotografias eram realizadas para

permitir a avaliação dos parâmetros geométricos dos depósitos.

## ENSAIOS REALIZADOS

Para cumprir os objetivos propostos no trabalho foram realizadas quatro séries de experimentos, buscando controlar e correlacionar os parâmetros de entrada: vazão; concentração e nível de base com os processos de transporte, erosão e deposição na região da calha fluvial e do delta (desembocadura do rio).

A primeira série de ensaio (SÉRIE I) considerou todos os parâmetros constantes, ou seja, vazão, concentração e nível de base foram estabelecidos sem nenhuma variação ao longo do tempo.

Após a primeira série de ensaios, os parâmetros de aporte foram sendo variados isoladamente, para identificar a sua influência na formação do delta gerado. Na segunda série (SÉRIE II), o parâmetro alterado foi a vazão de aporte. Picos de vazão com o dobro do valor médio foram introduzidos ao longo do tempo para identificar situações de cheias fluviais. Ainda, no último ensaio da série, uma vazão

quatro vezes superior à média (simulando um evento catastrófico natural) foi estabelecida.

Na terceira série de ensaio (SÉRIE III), foram modificados, isoladamente, dois parâmetros. Nos primeiros cinco ensaios, ocorreu o rebaixamento do nível de base da bacia (representando o nível do mar) e nos últimos três ensaios, a redução da concentração volumétrica de aporte de sedimentos.

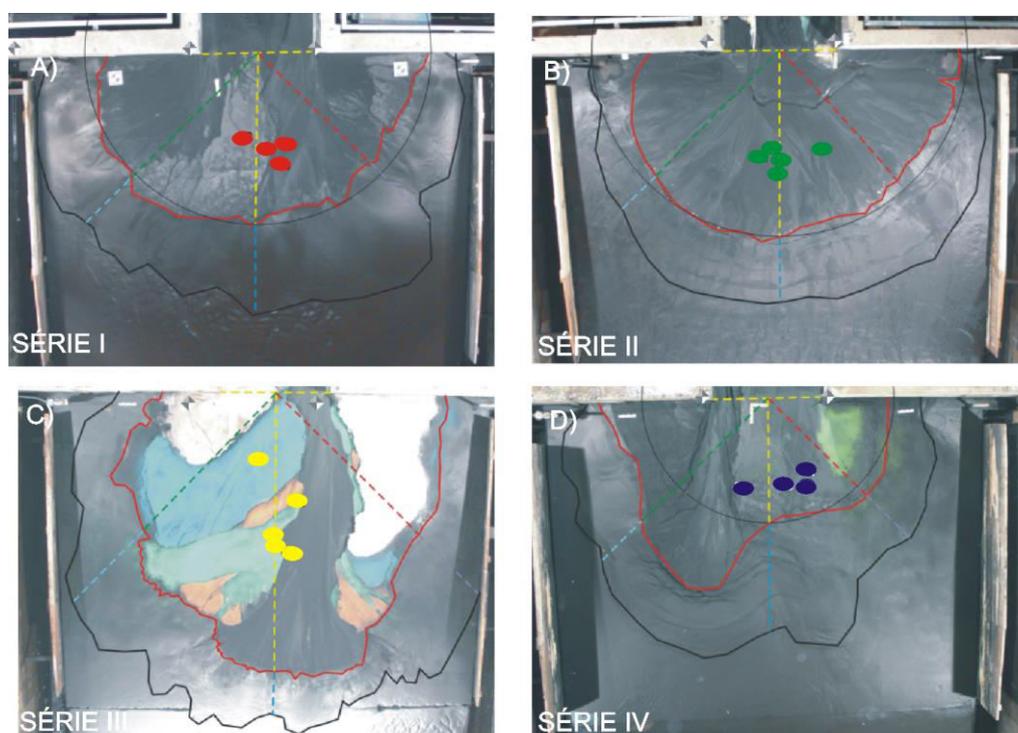
Após a avaliação dos parâmetros isolados, a quarta série de experimentos (SÉRIE IV) foi realizada com a variação de todos os parâmetros, ou seja, buscando criar cenários de rebaixamento e aumento de nível do mar, situações de cheias e de aporte constante e situações de aumento e diminuição de concentração. A tabela 1 apresenta um resumo das características de cada série. Ao todo 150 h de ensaios foram realizados nessas quatro séries.

**Tabela 1.** Características dos ensaios realizados.

Séries	Nº Ensaios	Duração (min)	Vazão	Concentração	Nível de Base
I	4	1170	Constante		
II	5	1600	Com picos = 2 x vazão média	Constante	Constante
	1	120	Com pico = 4x vazão média		
III	1	836	Constante	Constante	Constante
	4	1200			Diminuindo
	1	120		Reduzida 50%	
	1	140		Reduzida 75%	Constante
IV	1	135		Reduzida 90%	
	2	1200	Picos diminuindo	Reduzindo	Diminuindo
	1	600	Picos aumentando	Aumentando	Aumentando
	1	300	Picos diminuindo	Reduzindo	Diminuindo

## RESULTADOS

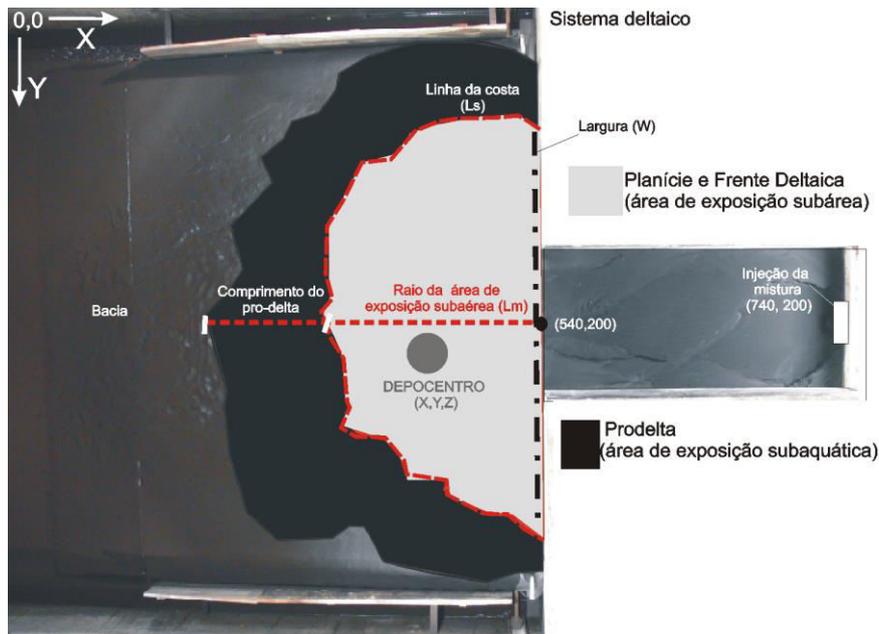
A figura 2 apresenta os depósitos deltaicos gerados ao final das quatro séries de experimentos.



**Figura 2.** Depósitos deltaicos gerados ao final de cada série de experimentos

A partir das imagens do depósito geradas ao final de cada série de experimento (figura 2), foi possível determinar diversos parâmetros geométricos dos ensaios. A figura 3 apresenta a nomenclatura dos parâmetros extraídos para estabelecer a geometria dos elementos que caracterizam o sistema deltaico, a saber: a planície deltaica, frente deltaica e prodelta formados durante a realização dos ensaios (Reading, 1996). O eixo central está localizado no centro do difusor de entrada do

material, enquanto que o raio da planície e frente deltaica ( $L_m$ ) é a distância entre o ponto inicial (início do desconfinamento) até a borda da exposição subaérea delineada pela linha de costa ( $L_s$ ) na linha de eixo central. Já o comprimento do prodelta, é a continuação desse raio até a zona da bacia. Os parâmetros foram medidos através de aplicativo gratuito para tratamento de imagens (Image Tool®) que repassava os valores, convertidos em distância, diretamente para uma planilha eletrônica.

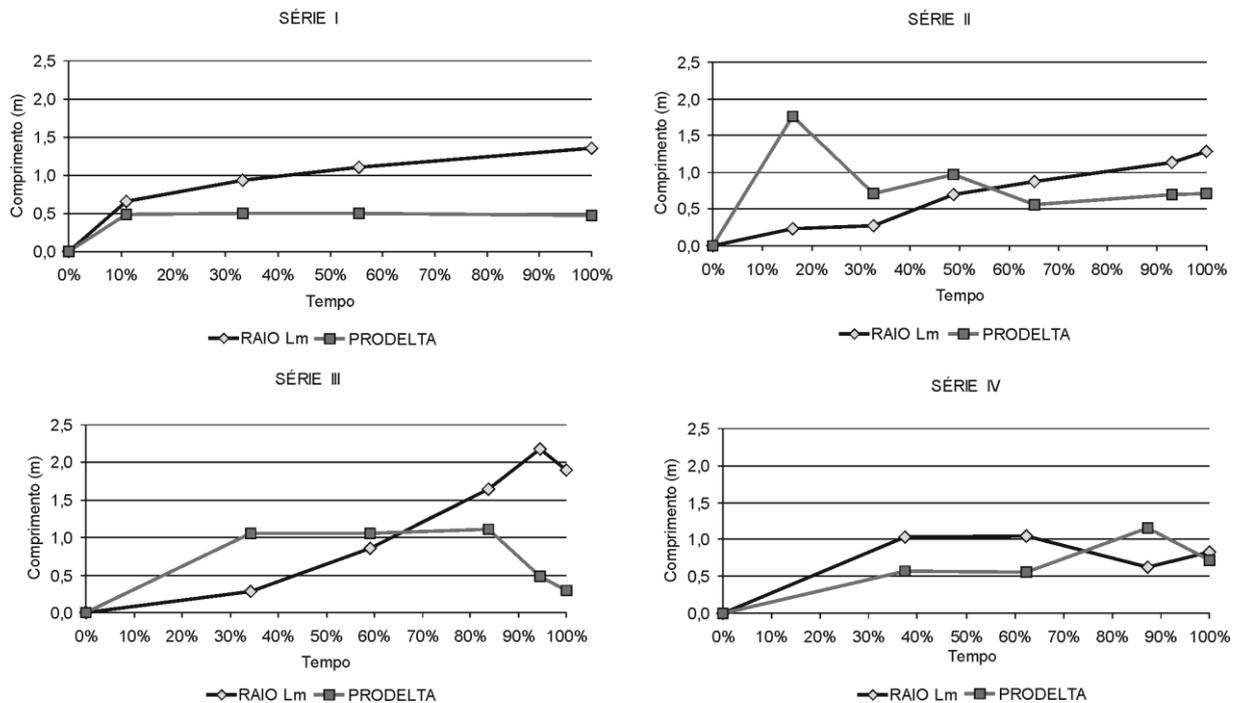


**Figura 3.** Esquema de nomenclatura dos parâmetros geométricos utilizados nas análises dos depósitos nas quatro séries de experimentos.

### Forma do depósito

A figura 4 apresenta os valores do raio da planície e frente deltaica ( $L_m$ ) e do comprimento do prodelta para todas as séries de ensaios ao longo do tempo. Destaca-se que, nesse caso, o eixo das abscissas está apresentado como a relação entre o tempo acumulado de cada ensaio realizado dentro da série dividido pelo tempo total acumulado da série.

Na SÉRIE I, pode-se notar que o raio da planície e frente deltaica vai aumentando com o incremento do tempo, em uma tendência praticamente linear, enquanto que o comprimento do prodelta fica constante, indicando não haver mudanças significativas ao longo do tempo. Também, nota-se que o comprimento do prodelta sempre foi inferior ao comprimento da planície e frente deltaica.



**Figura 4.** Comparação dos comprimentos do raio da planície e frente deltaica (raio  $L_m$ ) e do raio do prodelta em relação ao tempo de ensaio, para todas as series de ensaio.

Esse parâmetro mostra que, apesar dos parâmetros serem constantes nessa SÉRIE I, o raio da planície e frente deltaica foi sendo incrementado à medida que maior volume de mistura foi injetado.

Na SÉRIE II (com a introdução de picos de vazão intervalados), o raio da planície e frente deltaica ( $L_m$ ) apresentou comportamento diferenciado nos primeiros minutos (~20% do tempo) apresentando um valor menor quando comparado ao comprimento do prodelta, indicando que a área de exposição subaérea formada estava começando a avançar e se espalhar (alto valor do comprimento do prodelta) bacia adentro. A presença de espaço disponível e os picos de vazão podem ter contribuído para espalhar mais o material à frente. À medida que mais mistura foi sendo injetada, verifica-se que a progradação do delta foi mais acentuada (a partir dos 30% do tempo), porém no final, o raio da planície e frente deltaica apresentou comportamento similar ao apresentado na SÉRIE I (parâmetros de entrada constantes).

Na SÉRIE III, o rebaixamento do nível de base nos cinco primeiro ensaios (até 82% do tempo) propiciou mais espaço para o aumento da área de exposição subaérea avançar (sistema fluvial), apresentando um acréscimo bem acentuado no seu comprimento (inclinação ascendente da reta na figura 3). O mesmo ocorre até o penúltimo ensaio, com o rebaixamento da concentração volumétrica, onde novamente essa área de exposição subaérea avança consideravelmente. No último ensaio, porém, o sistema praticamente ficou estagnado. Com relação ao comprimento do prodelta, nota-se que, enquanto o nível estava sendo rebaixado, seu comprimento se manteve constante. Após as mudanças de condições do ensaio (após 80% do tempo), notou-se que esse comprimento foi menor. Nesse caso, a maior quantidade de material oriunda da zona canalizada (agradando a planície deltaica) foi a responsável por essa diminuição.

Na SÉRIE IV, o comportamento do raio da planície e frente deltaica e do comprimento do prodelta também foram influenciados pela mudança de parâmetros dos

ensaios. Enquanto o nível estava sendo rebaixado (até 60% do tempo), houve a progradação da planície e frente deltaica com um comprimento de prodelta constante. Já quando o nível foi aumentado, o sistema deltaico acumulou material (agradou) até a condição de nível máximo (de 60% a 90% do tempo), causando diminuição do raio da planície e frente deltaica, mas com aumento no comprimento do prodelta, mantendo o ângulo praticamente o mesmo. No último ensaio (de 90% a 100%), com o novo rebaixamento do nível, mais espaço foi criado para a área de exposição subaérea, o que ocasionou, novamente, aumento do seu raio.

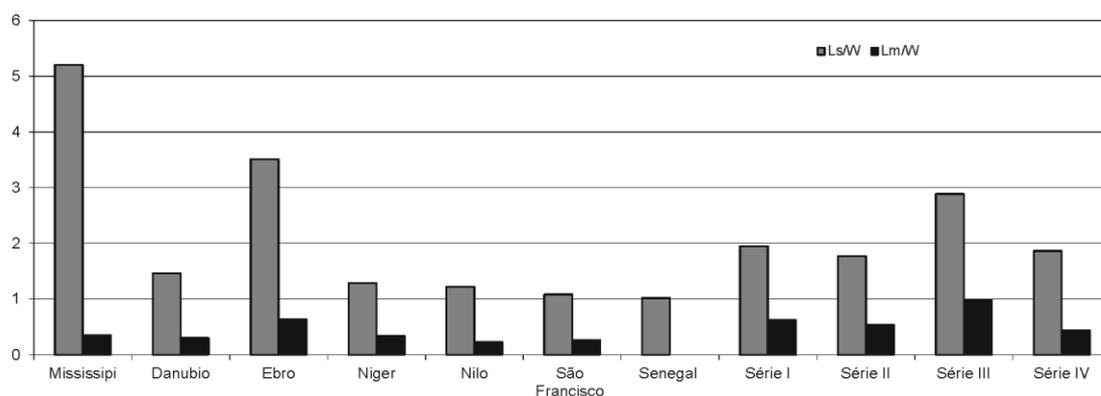
### **Relações de progradação e simetria do depósito formado**

Wright e Coleman (1973) propuseram alguns parâmetros geométricos para caracterização morfológica de sistemas deltaicos (apresentados na figura 3), os quais incluem a largura do delta ( $W$ ), o comprimento de avanço, que corresponde ao raio da planície e frente deltaica ( $L_m$ ) e a linha de costa ( $L_s$ ) caracterizada pelo comprimento da linha do depósito junto ao contato com o fluido ambiente. No seu estudo, os autores determinaram dois fatores de forma (geométricos) relacionando a largura do delta com o comprimento de costa ( $L_s/W$ ) e o comprimento de avanço do delta ( $L_m/W$ ), para sete deltas naturais (tabela 2). A tabela 2 e a figura 5 apresentam a comparação com os resultados encontrados nas simulações. Através desses fatores geométricos é possível estabelecer algumas comparações com o sistema natural, visando entender e correlacionar o avanço do sistema fluvial bacia adentro ( $L_m/W$ ) e sua irregularidade da linha de costa ( $L_s/W$ ).

Como pode ser evidenciado na figura 5, os dois parâmetros adimensionais avaliados tiveram o mesmo comportamento nos experimentos. As SÉRIES I, II e IV apresentaram praticamente os mesmos valores, enquanto que a SÉRIE III demonstrou comportamento diferenciado, com valores maiores.

**Tabela 2.** Comparação de parâmetros morfológicos de sete grandes deltas (Wright e Coleman, 1973) com os resultados experimentais.

Condição	Delta	País	Ls/W	Lm/W
Natural	Mississipi	EUA	5,2	0,35
	Danubio	Romênia	1,46	0,3
	Ebro	Espanha	3,51	0,64
	Niger	Nigéria	1,29	0,34
	Nilo	Egito	1,22	0,23
	São Francisco	Brasil	1,08	0,26
	Senegal	Senegal	1,02	-
Experimentos	Série I	-	1,95	0,62
	Série II	-	1,77	0,54
	Série III	-	2,88	0,99
	Série IV	-	1,86	0,44



**Figura 5.** Comparação entre parâmetros morfológicos (Ls/W) e (Lm/W) de sete grandes deltas (Wright & Coleman, 1973) com os resultados experimentais.

Fisicamente, o que esses resultados expressam é que tanto o avanço do delta quanto as irregularidades da linha de costa (sem promontórios, curvaturas excessivas etc.) praticamente não foram influenciados pela variação de vazão (picos de vazão). No caso estudado, a influência dos parâmetros médios (fora dos picos) predominou no comportamento do depósito. Já com relação ao nível de base e diminuição da concentração (fatores alterados na SÉRIE III) ocorreu alteração nesse comportamento. Nessa SÉRIE III, desde os primeiros experimentos, os deltas apresentaram assimetria no depósito, com uma forma mais alongada do que radial, e que se manteve até o final do ensaio. A presença de espaço para o sistema fluvial progredir (causado pelo rebaixamento de nível) foi a principal influência para que isso ocorresse, enquanto que o fator erosivo, devido à baixa concentração, também influenciou nesse comportamento.

No ensaio da SÉRIE IV, apesar dos valores terem sido similares às SÉRIES I e II,

as condições extremas do último ensaio fizeram com que houvesse aumento do comprimento da linha de costa, criando um lobo frontal a direita muito saliente (figura 2D). Isso demonstra que essas condições extremas podem gerar uma morfologia variada nos deltas naturais (criação de vales incisos e terraços, por exemplo)

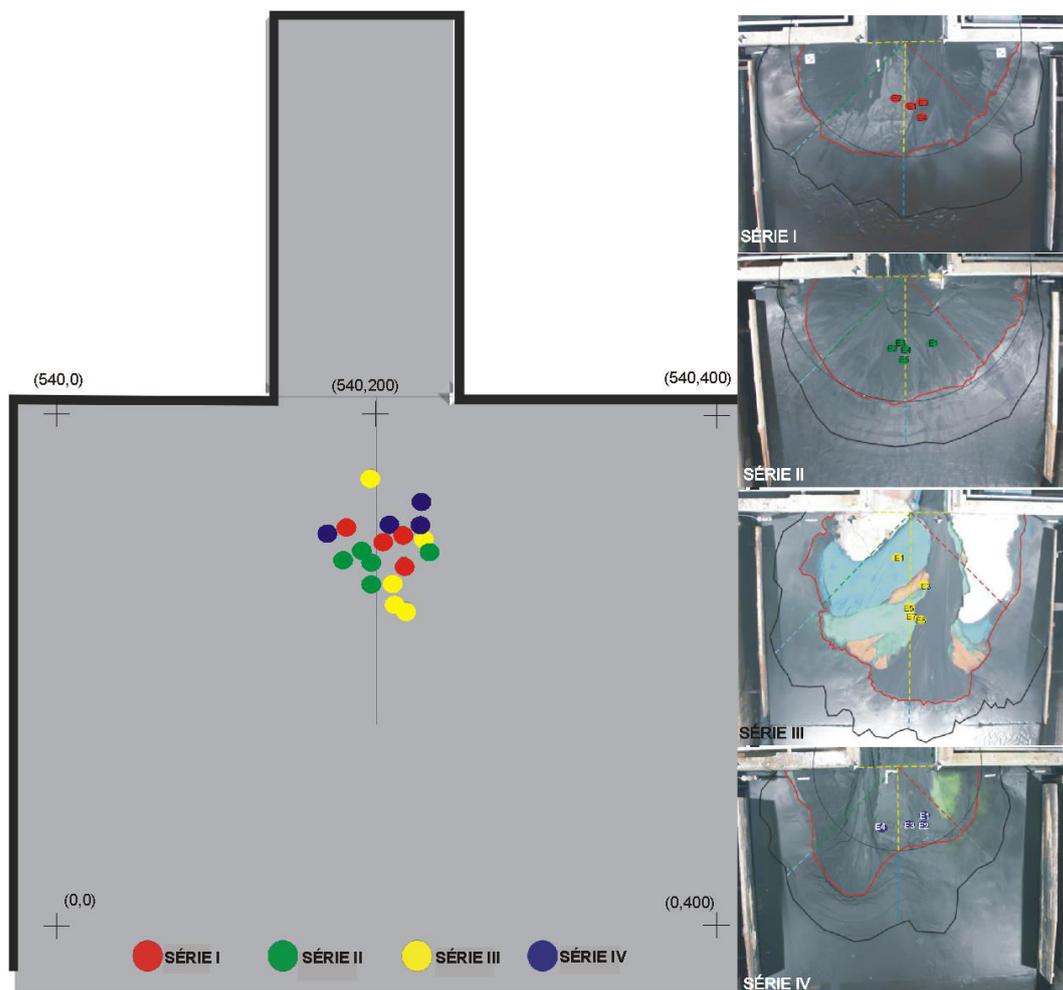
A comparação com os sete grandes deltas apresentados em Wright & Coleman (1973) indica que os valores encontrados corroboram com os sistemas deltaicos dominados por rios, no caso, Mississipi e Ebro principalmente.

### Determinação do depocentro do depósito

Para avaliar a evolução morfológica dos deltas formados e correlacioná-los com variáveis de entrada do ensaio foram determinados o centro de massa dos depósitos (depocentro do sistema deltaico gerado) para cada experimento na série. A figura 6 apresenta o resultado global dos centros de massa dos depósitos calculados (plano XY) de todos os ensaios, considerando o sistema de referência

apresentado na figura. Notar que o ponto  $x = 0$  e  $y = 0$  se encontra no canto a esquerda da

figura, na porção distal a leste da bacia.



**Figura 6.** Localização XY do centroide dos depósitos de cada ensaio dentro das séries de experimentos.

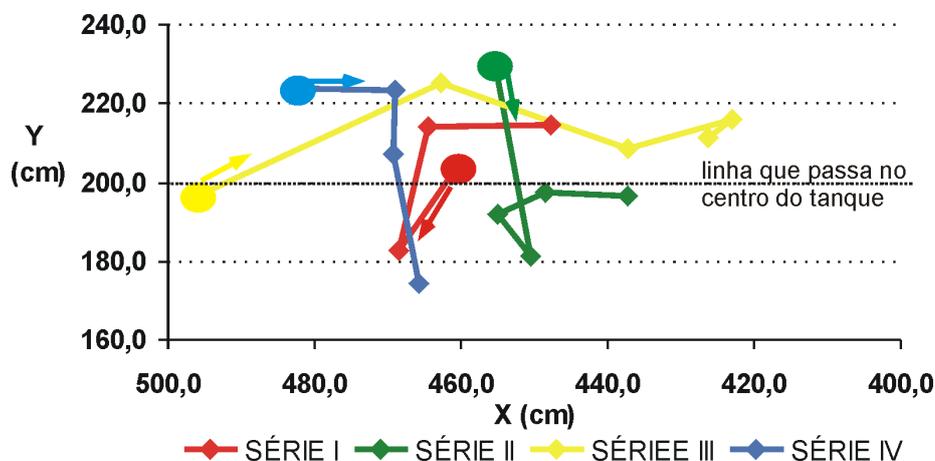
Com as coordenadas dos centroides X, Y e Z (espessura) calculadas, foi possível correlacionar os ensaios em termos de comportamento referente a três aspectos da dinâmica do delta: a progradação do delta, representada pela coordenada X; a compensação lateral, representada pela coordenada Y e, por fim, a agradação, representada pela coordenada Z. Em outras palavras, com esta análise pode-se descrever quando o sistema avança/retrocede, migra lateralmente para esquerda/direita e quando aumenta/diminui a espessura do depósito. Com esses três aspectos citados, é possível verificar quando ocorrem as mudanças de comportamento entre os ensaios.

A figura 7 apresenta a relação entre a progradação (coordenada X) e a compensação lateral (coordenada Y) para todas as fases.

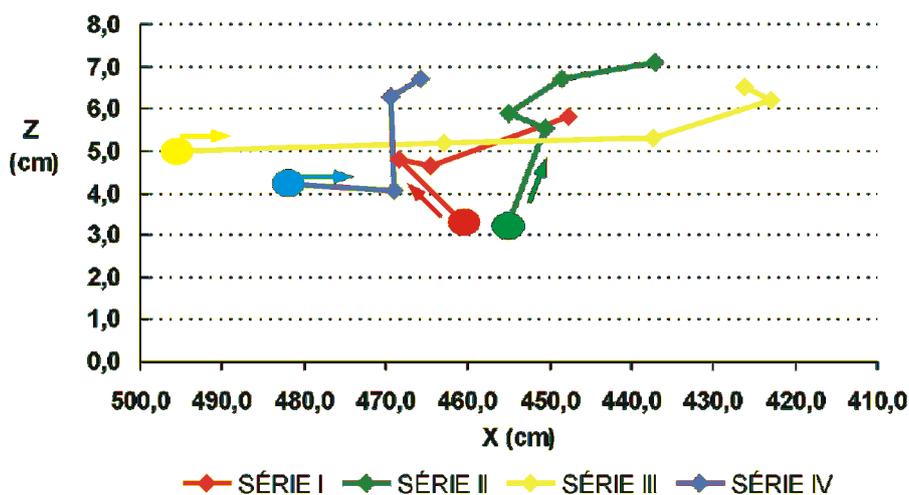
Para praticamente em todos os ensaios, houve a progradação do sistema deltaico (exceto em duas ocasiões nas SÉRIES I e II). Entretanto, em três das quatro fases dos experimentos (SÉRIES I, II e IV), verifica-se que a compensação lateral (deslocamento sobre o eixo das ordenadas) foi predominante sobre a progradação (eixo X), mostrando que o fluxo busca preencher o espaço de acomodação de sedimentos primeiro, para depois avançar com mais intensidade (comportamento do último ensaio das SÉRIES I e II). A exceção fica por conta da SÉRIE III, onde ocorre o contrário, ou seja, há uma progradação significativa em relação à migração lateral, ocasionada pelo rebaixamento de nível da bacia e também pela maior erosão a montante, devido ao ajuste da declividade do sistema fluvial. Esse comportamento é notado no primeiro ensaio da

SÉRIE IV, com um avanço significativo, porém no terceiro ensaio dessa série (aumento do nível base), o delta manteve-se estagnado com relação ao seu avanço e começou a migrar

lateralmente para uma zona que ainda não tinha sido preenchida de sedimentos. A correlação entre a progradação (X) e a agradação (Z) ocorrida nos ensaios é ilustrada na figura 8.



**Figura 7.** Relação entre a progradação e a compensação lateral do centroide dos depósitos (a coordenada X = 500 e Y = 200, representa o eixo central do tanque, junto à zona de desconfinamento - bacia). O valor da ordenada abaixo de (Y = 200), representa o lado direito do tanque e acima desse valor é o lado esquerdo do tanque. O círculo maior representa o primeiro ensaio da série e a seta indica a sequência dos próximos ensaios.



**Figura 8.** Relação entre a progradação (X) e a agradação (Z) do centroide dos depósitos.

Pela análise da figura 8, nota-se que, novamente, em todos os ensaios, ocorre a agradação do sistema acompanhada de uma progradação (avanço do sistema). Nesse caso, nota-se que nas SÉRIES I e II esse efeito é mais evidente, uma vez que as curvas apresentam inclinação positiva. Já na SÉRIE IV, o efeito é similar, porém com agradação mais vertical, ocasionada pelo aumento do nível de base da bacia que proporcionou maior espaço de acomodação, causando essa agradação abrupta. Novamente, a SÉRIE III apresenta comportamento variado, com uma grande progradação em relação à agradação. Nesse

caso, pode-se correlacionar o rebaixamento de nível a uma baixa agradação, uma vez que o sistema praticamente só prograda. Quando o nível foi mantido constante (últimos ensaios), nota-se novamente agradação significativa do sistema, com pequena retrogradação do delta (último ponto da curva), mostrando que a influência do nível é significativa no processo evolutivo do delta, conforme já evidenciando em Einsele, (1992), Coe et al., (2003), Muto & Steel, (2014) entre outros autores. A relação entre a compensação lateral e a agradação é apresentada na figura 9.

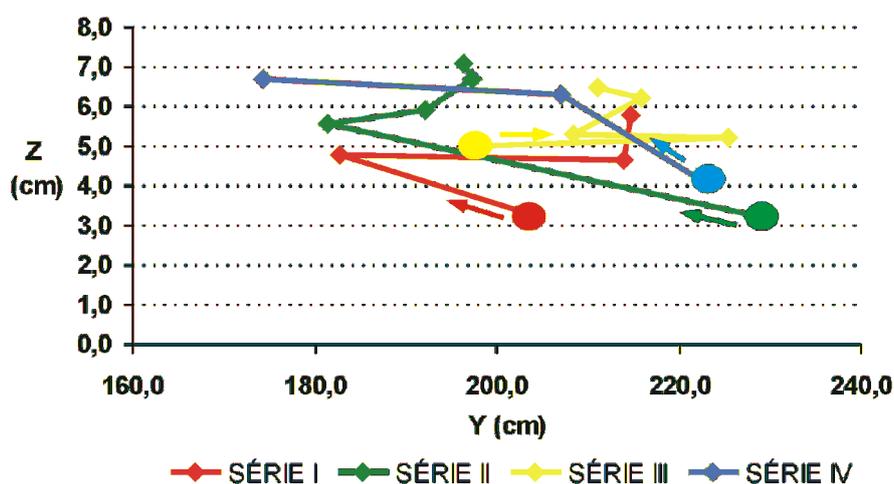


Figura 9. Relação entre a compensação (Y) e a agradação (Z) do centroide dos depósitos.

Verifica-se na figura 9 que em todos os casos houve a agradação do sistema, ou seja, independente da migração lateral (direita ou esquerda) que o sistema percorreu, este foi retendo material junto ao delta. Também se nota que houve a migração para os lados (mudança de eixo), buscando novamente, ocupar os espaços disponíveis. As SÉRIES I e II apresentam comportamento inicial muito similar, com a migração e a agradação praticamente na mesma taxa de aumento (retas paralelas), sendo que na SÉRIE I, houve uma nova migração maior (retorno ao lado direito do tanque), enquanto que na SÉRIE II, esse fenômeno foi menor (possivelmente ocasionado pelos picos de vazão). No final dessas duas fases, nota-se também que a frente deltaica só agradou, sem migrar lateralmente (linha vertical). Já a SÉRIE III, apresenta menor agradação e migração, conforme discutido anteriormente, uma vez que os processos de progradação prevaleceram. Na SÉRIE IV, nota-se que no início, o escoamento prevalecia num lado do tanque (pouca migração), só ocorrendo a compensação de lado no último ensaio, após muito material ser retido no lado inicial.

#### Relação da Progradação/Compensação lateral/Agradação com os parâmetros médios de entrada do ensaio

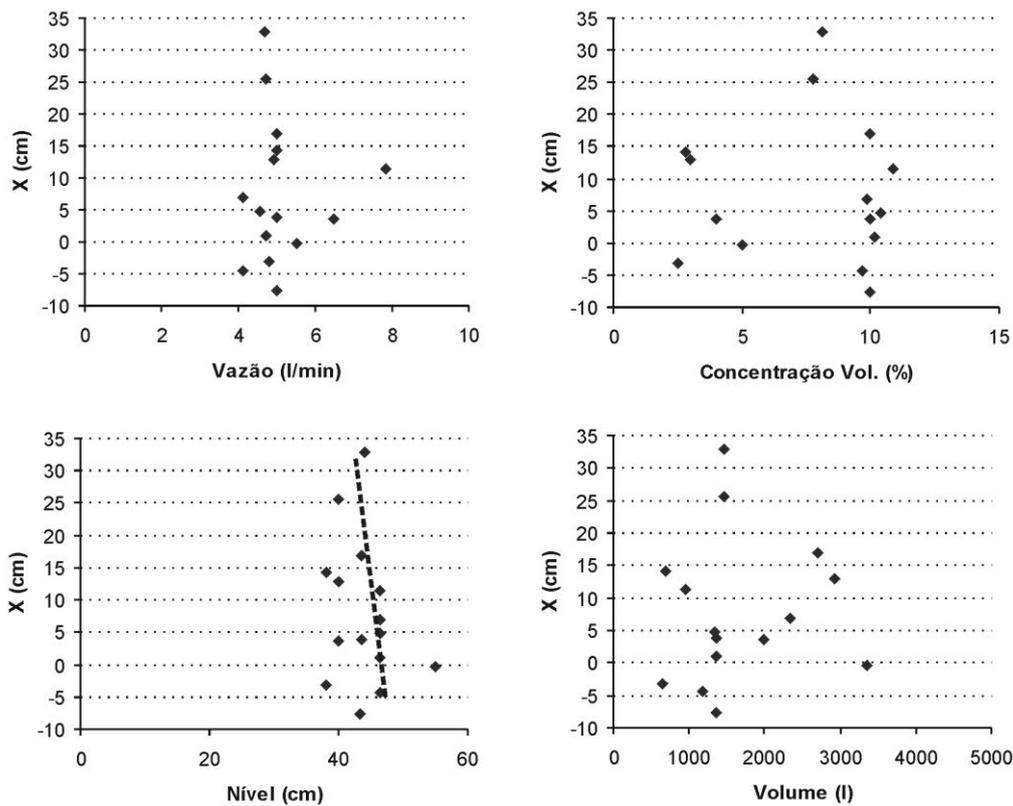
Após a avaliação da comparação entre os três diferentes tipos de processos dinâmicos que controlam a evolução do delta, buscou-se correlacionar esses processos com os

parâmetros médios de entrada dos ensaios, no caso, a vazão, o volume, a concentração volumétrica e o nível de base. Para tal, foi considerado o incremento relativo dos valores das coordenadas X, Y e Z do centroide em relação ao primeiro ensaio de cada fase.

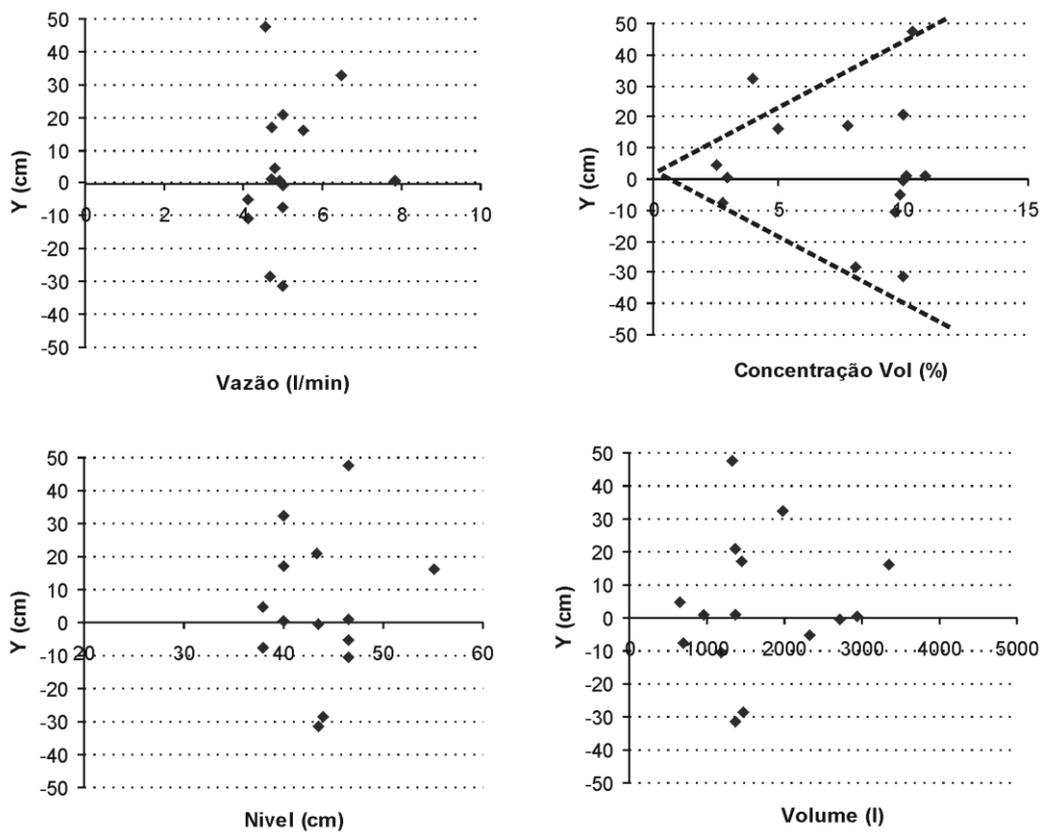
A figura 10 apresenta uma relação entre os dados dos quatro parâmetros médios com a progradação (X) do sistema deltaico.

Como pode ser observado na figura 10, em termos globais, a vazão e a concentração média dos ensaios não apresentam tendências de comportamento claramente definidas com relação à progradação do escoamento, indicando que para mesmos valores (vazão = 5 l/min e  $C_{vol} = 10\%$ ) diversos valores de incrementos (progradação/retroprogradação) foram verificados. Já para o nível de base, nota-se que há certa tendência nos valores de aumento de incremento de X (progradação), à medida que o nível está sendo rebaixado, o que demonstra certa lógica, já que há mais espaço para o avanço da planície deltaica e da frente deltaica (área de exposição subaérea), apesar da diminuição do espaço de acomodação (área de exposição subaquática) causado pelo rebaixamento desse nível. Com relação ao volume, não se nota, claramente uma tendência de comportamento definida, podendo ser explicada pela influência dos outros fatores envolvidos no processo (autogênicos).

A figura 11 apresenta os resultados com relação à compensação lateral.



**Figura 10.** Correlação dos parâmetros de entrada dos ensaios com incremento relativo do comprimento do centroide (progradação da coordenada X). Os pontos no gráfico correspondem a todos os ensaios realizados.



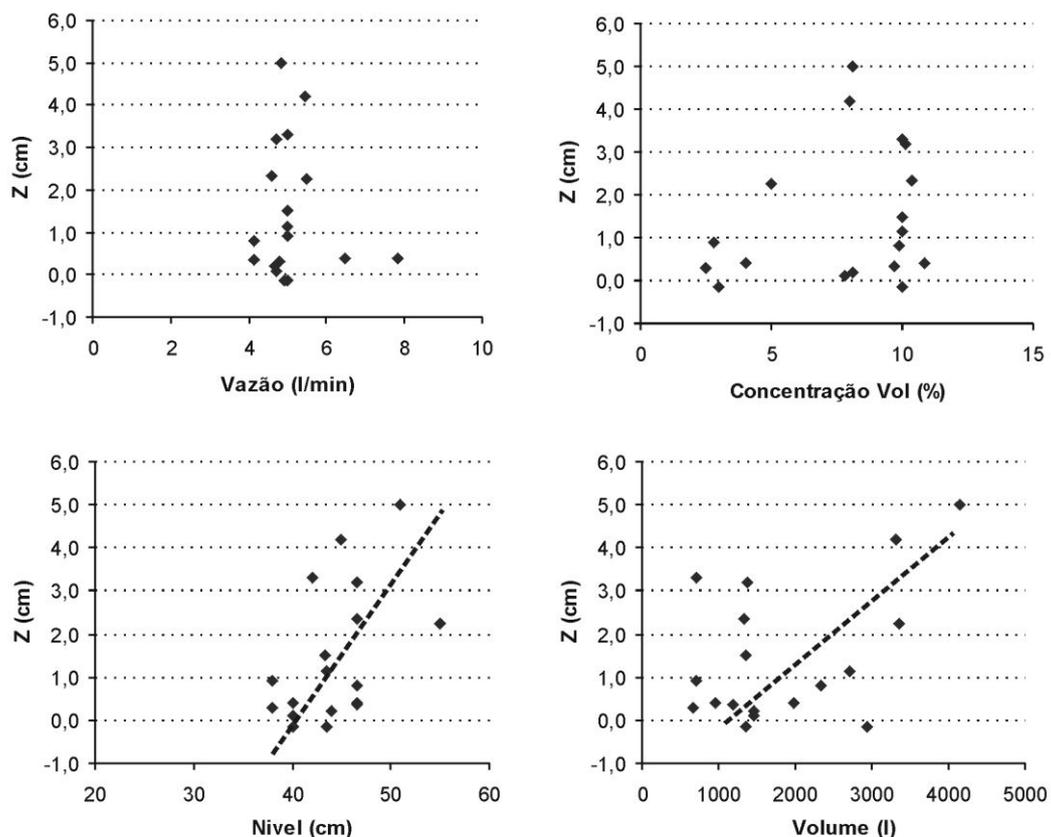
**Figura 11.** Correlação dos parâmetros de entrada dos ensaios com incremento do comprimento lateral do centroide (compensação lateral – coordenada Y). Os pontos no gráfico correspondem a todos os ensaios realizados.

A comparação entre os parâmetros médios de entrada com a compensação lateral não apresenta tendência definida de comportamento, já que se nota em ambos os lados do eixo Y (positivo e negativo), a presença dessa migração. Ainda assim, no caso da concentração volumétrica, há pequena tendência de aumento da migração com o aumento da concentração (abertura do cone indicado na figura 11 acima a direita), mostrando que baixas concentrações tenderiam a compensar menos lateralmente, enquanto que

fluxos mais concentrados, com maior presença de material tenderiam a compensar mais.

Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de processos erosivos causados pela baixa concentração de sedimentos ao longo do tempo, gerando um canal que transferia a jusante toda a carga sedimentar (conforme foi constatado nos ensaios das SÉRIES III e IV).

A figura 12 apresenta a correlação da variação da espessura do depósito (agradção), com os parâmetros de entrada.



**Figura 12.** Correlação dos parâmetros de entrada dos ensaios com incremento da espessura do centroide (agradção – coordenada Z). Os pontos no gráfico correspondem a todos os ensaios.

Como pode ser observado na figura 12, a agradção é influenciada pelo nível de base e pelo volume injetado (linhas tracejadas indicadas na figura). No primeiro caso, é natural que essa correlação exista, uma vez que está fortemente relacionada à existência de mais espaço disponível para a acomodação de sedimentos. Já no caso do volume, essa relação não é tão simples, uma vez que os sedimentos podem se espalhar lateralmente, porém, ainda é notado um incremento da espessura do depósito em função desse parâmetro médio. O mesmo se

esperaria da concentração volumétrica, já que mais material está sendo inserido no tanque, porém os resultados mostraram que a tendência do fluxo em aumentar sua espessura foi contrabalançada por algum outro parâmetro (que não foi quantificado) que não tornou evidente a relação. Já para a vazão seria esperada tendência inversa, com o material sendo progadado (transferido a jusante), diminuindo a espessura do sistema deltaico final, entretanto, esse comportamento não foi evidenciado nos dados.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E IMPLICAÇÕES NA TRANSFERÊNCIA DE SEDIMENTO À BACIA

A determinação dos parâmetros geométricos permitiu uma primeira avaliação sobre os processos de progradação ou retrogradação, compensação lateral e agradação dos sistemas deltaicos simulados experimentalmente. Com relação aos resultados, notou-se que os ensaios com fluxos médios geraram um delta semelhante ao tipo Gilbert (Gilbert, 1885), ou seja, praticamente simétrico e com mesmo comprimento da frente deltaica. O equilíbrio lateral (compensação lateral) foi sempre ocorrendo na zona de acomodação de sedimentos. Cabe salientar, que na SÉRIE II, independente dos picos de vazões (2x em relação à média) ocorrendo em intervalos pré-determinados, o comportamento da forma do sistema deltaico foi muito similar ao da SÉRIE I, indicando que a formação da planície deltaica, em termos gerais, respondeu mais aos intervalos de vazão média (fora dos picos) do que às condições de mudança de regime. Muto et al., (2012) e Muto & Steel, (2014) apresentam o conceito de hipótese de resposta em equilíbrio aplicado a sistemas deltaicos, ou seja, que a configuração estratigráfica ou comportamento sedimentar desse sistema será estável ou permanente quando submetida a forças externas, igualmente estáveis ou permanentes (caso da Série I). Entretanto, mesmo com mudanças nas forças externas na Série II, essas não ocorrem em escala de tempo suficientemente longa para causar um efeito significativo no depósito gerado final.

Definitivamente, a mudança do nível de base e a diminuição da concentração (suprimento de sedimentos) são os principais fatores de mudança de geometria/forma dos deltas gerados. Esses parâmetros podem ser relacionados com o conceito de espaço para acomodação de sedimentos e o suprimento de sedimentos ao longo do tempo (Einsele, 2000; Porebski & Steel, 2006; Hellend-Hansen & Hampton, 2009 e Muto & Steel, 2014). A mudança do nível de base atua diretamente na criação ou redução do espaço de acomodação de sedimentos. Já a diminuição da concentração propicia a geração de processos erosivos (vales

incisos) junto à planície fluvial e deltaica, transferindo esses sedimentos a jusante, causando a progradação do sistema deltaico (deltas assimétricos), assim como já evidenciados em Muto e Steel (2004).

Por outro lado, quando o nível de água aumenta, ocorre a transgressão e a agradação do depósito (aumento de espessura), com a predominância do processo de acomodação formando deltas governados pela acomodação (Porebski & Steel, 2006). Se a vazão é mantida constante durante esse aumento do nível de base, como no caso simulado na SÉRIE III, pode ocorrer uma resposta de não equilíbrio autogênico do sistema deltaico (Muto & Steel, 2014), uma vez que à medida que o sistema deltaico foi crescendo, uma fração cada vez maior de sedimentos fornecida constantemente pelo sistema alimentador (fonte de sedimentos) ficou retida pela deposição aluvial e na planície deltaica, fazendo com que os sedimentos disponíveis para progradação do delta tendessem a diminuir com o tempo (Muto & Steel, 1992 e Muto & Steel, 1997). Nessa situação, também ocorreu o auto recuo, definido como o recuo em direção à terra da linha costeira (Ls), que ocorre, inevitavelmente, em condições de taxa constante de aumento do nível em relação ao nível do mar (Muto & Steel, 1997).

Nas situações de nível de base sem rebaixamento (nível constante nos casos das SÉRIES I e II), verificou-se uma tendência do sistema deltaico em progradar rapidamente, enquanto há espaço disponível para acomodação e quando a taxa de suprimento é maior do que a taxa de acomodação (Porebski & Steel, 2006), já que não há subsidência e essa acomodação depende exclusivamente do nível de base. Após o preenchimento de material, o avanço se torna mais lento e ocorre uma agradação maior do sistema, com respectiva migração lateral. Assim, se esse equilíbrio de resposta for mantido, ou seja, sem algum outro fator externo (alotênico), a tendência de avanço não será rápida e, sim, estável em direção à quebra da plataforma. Blum & Torquist (2000) correlacionam agradação e degradação dos

canais aluviais com a vazão (potência do fluxo) e o suprimento de sedimentos, apresentando que os canais agradam quando o suprimento de sedimentos excede a capacidade de transporte correspondente àquela vazão e degradam quando o contrário ocorre. Esse conceito pode ser aplicado para o caso das SÉRIES I e II, indicando que não só a acomodação, mas sim a capacidade de transporte de sedimentos foram fatores influentes na formação dos sistemas gerados.

Deltas são consequências do constante conflito entre o rio e o mar (Wright & Coleman, 1973). Nesse sentido, a análise da relação dos processos dinâmicos de formação do delta com os parâmetros médios de aporte dos ensaios, quais sejam, a vazão, a concentração volumétrica, o nível de base e o volume sedimentos aportado, mostraram o quão complexo é esse fenômeno, uma vez que a tentativa de análise, isolando os parâmetros médios, apenas mostraram leves tendências de comportamento. Nesse caso, não só os efeitos externos (alógênicos) são importantes, mas também, os processos internos (autogênicos) que alteram a dinâmica de formação do delta. Muto & Steel, (2004); Straub & Wang, (2013) e Muto & Steel, (2014) fazem uma discussão sobre os efeitos dessas forçantes com relação à resposta do sistema deltaico.

Um exemplo disso ficou evidenciado no último ensaio da SÉRIE IV, onde se buscou criar uma condição mais catastrófica de fatores exógenos na tentativa de transferir muito material à frente (progradação rápida). Durante o ensaio, o fluxo migrou para o lado direito (zona com menos sedimentos depositados) e, apesar das condições mais severas, este se manteve nessa posição. Ainda assim, a formação desse depósito mais proeminente ao final da SÉRIE IV, indica que maior

transferência de material ocorreu em relação à sua largura e em relação às outras séries de experimentos simuladas. A intensidade dessas mudanças em um curto intervalo de tempo (eventos mais catastróficos) é um indicativo que a morfologia deltaica pode ser alterada, ocasionando um maior avanço de sedimentos em direção à bacia. Porebsky & Steel (2006) classificam esses sistemas deltaicos gerados na SÉRIE IV como sistemas governados pela acomodação (migrando para frente e para trás e direcionados de acordo com flutuações do nível do mar num curto espaço de tempo geológico), enquanto que os sistemas deltaicos governados pelo suprimento são aqueles que chegam na borda da plataforma sem influência do rebaixamento do nível de base (no caso os da SÉRIES I e II).

A comparação da morfologia dos deltas gerados em laboratório com os deltas naturais apresentados em Wright & Coleman (1973), em termos dos parâmetros adimensionais, mostraram coerência nos valores. Deltas naturais dominados por rios, como o Mississipi e o Ebro, apresentam os maiores valores de linha de costa (maior irregularidade no seu traçado), enquanto que os deltas dominados por ondas (São Francisco e Senegal) apresentam valores menores. Nos experimentos, independentes dos cenários utilizados, os valores foram elevados para esse parâmetro, o que é corroborado pelos valores naturais. Apesar das simplificações inerentes aos métodos experimentais, os resultados apresentados aqui indicam um potencial para contribuir no entendimento da dinâmica de transferência de sedimentos nos deltas naturais, assim como já fizeram Muto & Steel, (2001), Kostic & Parker, (2003), Van Dick et al., (2009) entre outros.

## CONCLUSÕES

Este trabalho visou caracterizar geometricamente o depósito deltaico gerado em simulações tridimensionais a partir de diversas condições de aporte fluvial, bem como de alteração de nível de base da bacia, buscando entender quais fatores são mais significativos na formação dos deltas e como se dá o processo sedimentar.

Através da padronização dos procedimentos experimentais utilizados, foi possível realizar a caracterização geométrica dos depósitos deltaicos sob diferentes condições de aporte e estabelecer quais fatores influenciam na sua dinâmica e evolução ao longo do tempo. Experimentalmente, verificou-se que o nível de base e a diminuição da

concentração foram os principais fatores de mudança de geometria/forma dos deltas. O primeiro por reduzir o espaço do corpo de água (área de exposição subaquática), avançando a área de exposição subaérea (planície e frente deltaica). Assim, uma vez que o nível rebaixa, ocorre a progradação do sistema e, quando o nível aumenta, ocorre a sua agradação (aumento de espessura). O segundo fator, diminuição da concentração, provoca processos erosivos (vales incisos) junto à planície fluvial e deltaica, transferindo esses sedimentos a jusante, causando progradação do sistema deltaico (deltas assimétricos). A vazão também é responsável por mudanças nos aspectos geométricos do delta formado, porém está condicionada à sua intensidade e permanência, já que os ensaios mostraram que eventos mais catastróficos (alta intensidade em um breve

intervalo de tempo) são um indicativo que mais material pode ser transferido a jusante.

Contudo, por se tratar de experimento com múltiplas variáveis, nem todas puderam ser controladas e programadas. Também, há variáveis derivadas da própria evolução das formas (autogênicas), cuja causa não depende somente do controle “externo” proposto (alogênicas), mas da interação de todos os fatores ao longo do tempo de simulação. Apesar da tentativa de englobar todos os cenários de simulação propostos, alguns aspectos não foram abordados na sua totalidade, como, por exemplo, os aspectos relacionados à instabilização do delta ao tipo e composição granulométrica dos sedimentos. No caso, os experimentos utilizaram pouca presença de materiais finos e de argilas, o que certamente alteraria a geometria do depósito final.

## AGRADECIMENTOS

A toda equipe de funcionários do NECOD e à empresa PETROBRAS S.A pelo incentivo à pesquisa brasileira de qualidade.

## REFERÊNCIAS

1. BHATTACHARYA, J.P., (2006), Deltas, in Posamentier, H e Walker, R.G, eds., *Facies Models Revisited—SEPM*, pg. 237 – 293.
2. COE, A. L., BOSENCE, D., CHURCH, K. D., FLINT, S. S., HOWELL, J. A. & WILSON, R. C. L. 2003. *The Sedimentary Record of Sea-Level Change* (edited by: Angela L. Coe). Cambridge University Press and The Open University, 288pp. (ISBN 978 0 521 53842 4)
3. DEL REY, A.C. (2006) Simulação física de processos gravitacionais subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre (RS), 229 pp.
4. DUCKER, R. (2007). “Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez. Dissertação (Mestrado em Engenharia) de Mestrado- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH Porto Alegre/UFRGS.84p
5. EINSELE, G. (1992) *Sedimentary Basins: Evolution, Facies and Sediment Budget*, Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-54743-6; 628 p
6. GILBERT, G. K (1885) The topography features of lake shores. *Annual review* nº 5. USGS pg 75-123,
7. KOSTIC, S., PARKER, G., (2003). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs, part 2: experiment and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research* 41 (2), 141–152.
8. MANICA, R. (2002). “Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) de Mestrado- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH Porto Alegre/UFRGS.130p.
9. MANICA, R.; DEL REY, A. C.; MAESTRI, R. D.; BORGES, A. L. de O.; VIANA, A. R. (2005). Influência do mecanismo de iniciação na dinâmica dos fluxos e na geometria dos depósitos gerados: observações obtidas a partir de estudo experimental de correntes de densidade não-conservativas. *B. Geociências da Petrobras* 13(1): 43-60.
10. MUTO, T. (2001) Shoreline autoretreat substantiated in flume experiments. *J. Sed. Res.*, 71, 246–254.
11. MUTO, T, PETTER, A. J., STEEL, R. J, SWENSON, J.B. TOMER, A E PARKER, G (2012). Responses of River Deltas to Sea-Level and Supply Forcing: Autostratigraphic View, *Earth Sciences*, Dr. Imran Ahmad Dar (Ed.), ISBN: 978-953-307-861-8, InTech, DOI: 10.5772/26643. Available from: <http://www.intechopen.com/books/earth-sciences/responses-of-river-deltas-to-sea-level-and-supply-forcing-autostratigraphic-view>
12. MUTO, T e STEEL, R. J. (1992) Retreat of the front in a prograding delta. *Geology*, 20, 967–970.
13. MUTO, T e STEEL, R. J. (1997) Principles of regression and transgression: the nature of the interplay between accommodation and sediment supply. *J. Sed. Res.*, 67, 994–1000.
14. MUTO, T e STEEL, R. J. (2004) Autogenic response of fluvial deltas to steady sea-level fall: Implications from flume-tank experiments. *Geology*; v. 32; no. 5; p. 401–404; doi: 10.1130/G20269.1; 3
15. MUTO, T e STEEL, R. J. (2014) The autostratigraphic view of responses of river deltas to external forcing: A review of the concepts. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.* (2014) 46, 139–148; 10.1130/G20269.1; 3
16. PAOLA, C, KYLE STRAUB, DAVID MOHRIG, LIAM REINHARDT (2009) The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments *Earth-Science Reviews* 97 1–43

17. POREBSKI, S.J., e STEEL, R.J., (2006), Delta types and sea level change. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, v. 76, 390–403
18. READING, H. G (1996) *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*, 3rd Edition. ISBN: 978-0-632-03627-1. 704 p.
19. THORNE, A & SWIFT, J. P. (2009) Sedimentation on Continental Margins, VI: A Regime Model for Depositional Sequences, their Component Systems Tracts, and Bounding Surfaces (pages 189–255) in *Shelf Sand and Sandstone Bodies: Geometry, Facies and Sequence Stratigraphy* (Print ISBN: 9780632032372) Online ISBN: 9781444303933 DOI: 10.1002/9781444303933
20. VAN DIJK, M, POSTMA, G and KLEINHANS, M. G. (2009) Autocyclic behaviour of fan deltas: an analogue experimental - *Sedimentology* 56, 1569–1589
21. WRIGHT, L. D. e COLEMAN, J. M (1973) Variations in morphology of major river deltas as function of ocean wave and river discharge regimes. *AAPG – American Association Petroleum Geologists bulletin*, nº 57 pg 370-398.

*Manuscrito recebido em: 24 de Fevereiro de 2015*

*Revisado e Aceito em: 08 de Julho de 2015*