

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS REDUCTORES DE ENERGÍA (MUDFLOW BREAKER) POR MEDIO DE ENSAYOS FÍSICOS.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mauro Nalesso

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br.:
Valera Campos, Verónica Alexalis
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2007

ACTA DE APROBACIÓN

El día 16 de febrero de 2007, se reunió el jurado formado por los profesores:

Maria Elena Bello

Yuri Medina

José de Jesús Gaspar

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS REDUCTORES DE ENERGÍA (MUDFLOW BREAKER) POR MEDIO DE ENSAYOS FÍSICOS”.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

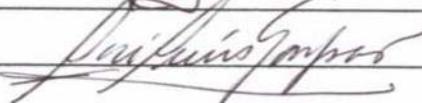
Una vez oída la defensa oral que la bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Verónica Alexalis Valera Campos	20	VEINTE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO





Caracas, 16 de FEBRERO de 2007.

DEDICATORIA

A Dios, por siempre estar en mi vida manifestándose de formas extraordinarias y por darme la fortaleza de seguir adelante.

A mi mami Alba, porque con tu inmenso amor, esfuerzo y sacrificio me haz sacado adelante. Todo esto te lo debo a ti.

A mi abuela Juana, por brindarme cariño, cuidados y sabios consejos.

A mi hermano Ronmer, por estar ahí cuando te he necesitado, orando por mí, dándome tú apoyo y animo para seguir adelante.

A Alirio, por tu paciencia porque a pesar de la distancia seguiste a mi lado dándome tú amor, confianza y apoyo.

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Proyecto G-2005000507, titulado: EVALUACIÓN DE OBRAS DE CONTROL PARA ALUDES TORRENCIALES Y DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN SUS PROXIMIDADES, financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT).

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Mauro Nalesso, por su guía durante el desarrollo del trabajo, por su valioso aporte y tiempo dedicado.

Al Prof. Iván Saavedra, por permitirme la utilización de las instalaciones del Instituto de Mecánica de los Fluidos (IMF) para el desarrollo de esta investigación.

Al técnico Pablo Cequea, por su valiosa ayuda y disponibilidad durante el desarrollo de la parte experimental.

Al Prof. Rodolfo Berrios, por su colaboración y guía en el desarrollo de la tesis.

Al Prof. Julio Viera (mi padrastro), por su apoyo durante toda mi carrera y su valiosa colaboración en la revisión de la redacción del trabajo.

Al Prof. Armando Blanco, por el suministro de información necesaria para la realización del trabajo.

A la Prof. Jimena Arcaya, por su dedicación y valiosa colaboración en la revisión de la redacción del trabajo.

A Leonor Iglesias y Marianis Urbina, mis amigas incondicionales gracias por su apoyo.

A Marian Franchi, por su ayuda desinteresada y sabios consejos.

A Maria De Barros, mi amiga y compañera durante toda la carrera, gracias por tu apoyo y estímulo.

A la Sra. Yilda Sierra, por su colaboración y confianza depositada en mí.

A Nelson Fernández, Henry Sarmientos, Andrés Abeldaño, Jorge Campos y Jorge García, por su colaboración en la realización de los ensayos.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron con este logro.

Valera C. Verónica A.

**EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO
HIDRAULICO DE LOS REDUCTORES DE ENERGÍA (MUDFLOW
BREAKER) POR MEDIO DE ENSAYOS FÍSICOS.**

Tutor Académico: Prof. Mauro Nalesso.

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2007, n° pág.(109).

Palabras Clave: Flujos de Lodo, Reductores de Energía, Modelaje Físico.

Resumen. Los aludes torrenciales son fenómenos naturales, originados usualmente por lluvias prolongadas e intensas, las cuales saturan los suelos produciendo derrumbes y deslizamientos en la montaña dando origen a los flujos torrenciales, esto ocurre principalmente en la cuenca contribuyente donde se produce la mayor parte del material de arrastre, luego estos flujos son transportados a lo largo de la garganta y finalmente depositados en el cono de deyección originando inundaciones de sedimento. Las inundaciones se convierten en problema, cuando el hombre se establece sobre el cono de deyección, exponiendo sus vidas y propiedades ante las inundaciones de estos flujos torrenciales. Una manera de disminuir el riesgo en las zonas densamente pobladas es colocando obras de control tanto en la garganta como en el cono de deyección del torrente. Una de estas obras de control son los reductores de energía, que normalmente se ubican en las fosas de sedimentación de las presas o en las entradas de los conos de deyección. En esta investigación se estudia el caso de los reductores de energía ubicados en la entrada del cono de deyección, cuya inserción tiene como finalidad localizar fenómenos de erosión y disminuir la capacidad destructiva de los flujos torrenciales mediante disipación de energía. El propósito de esta investigación es evaluar cualitativamente el comportamiento de los reductores de energía ubicados a la entrada del cono de deyección, ante aludes torrenciales a través de la realización de un modelaje físico. Para el modelaje físico se utilizó un aparato experimental que representa la parte baja de una cuenca, cinco modelos de reductores ubicados en tres configuraciones distintas sobre un fondo erosionable y dos tipos de lodo. De la experimentación se obtuvo como resultado que el modelo de reductor y la disposición más eficiente, en cuanto a disipación de energía y disminución de la erosión tanto aguas arriba como aguas abajo de los reductores, es el modelo M-5 dispuesto en dos filas.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICOS/FIGURAS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2. MARCO REFERENCIAL	7
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1. <i>Objetivo general:</i>	9
1.3.2. <i>Objetivos específicos:</i>	9

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. TORRENTE.....	11
2.1.1. <i>Partes de un torrente</i>	12
2.2. ORIGEN DE LOS SEDIMENTOS	14
2.2.1. <i>La erosión de la cuenca</i>	14
2.2.2. <i>La erosión del cauce</i>	14
2.2.3. <i>Los deslizamientos de terreno</i>	15
2.3. PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS	15
2.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	16
2.4.1. <i>Carga de fondo</i>	16
2.4.2. <i>Carga en suspensión</i>	17
2.4.3. <i>Carga disuelta:</i>	17
2.4.4. <i>Carga neutral flotante</i>	18
2.5. MOVIMIENTOS DE MASA	18
2.5.1. <i>Procesos que facilitan los movimientos de masas</i>	18
2.5.2. <i>Clasificación de los movimientos de masas</i>	19
2.6. ALUDES TORRENCIALES	23
2.6.1. <i>Modelos básicos de movimientos de aludes torrenciales</i>	25
2.6.2. <i>Factores importantes que controlan los modelos de movimientos de aludes torrenciales</i>	26
2.6.3. <i>Clasificación de Aludes Torrenciales</i>	26
2.6.4. <i>Causa de las altas concentraciones</i>	30
2.6.5. <i>Consecuencias de las altas concentraciones</i>	31
2.6.6. <i>Zonas de generación, transporte y depósito de los aludes torrenciales</i>	33
2.6.7. <i>Reología de los flujos hiperconcentrados</i>	35

2.7.	ESTRUCTURAS REDUCTORAS DE ENERGÍA	37
2.8.	EROSIONABILIDAD	39
2.8.1.	<i>Erosionabilidad en suelos no cohesivos</i>	39
2.8.2.	<i>Erosionabilidad en suelos cohesivos</i>	39
2.9.	SIMILITUD DE FLUJOS CON SUPERFICIE LIBRE	40
 CAPÍTULO 3		
	MÉTODO	43
3.1.	ELABORACIÓN DE LODOS	44
3.2.	VERIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS LODOS.....	46
3.3.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL	48
3.4.	DISEÑO DE LOS REDUCTORES DE ENERGÍA	50
3.5.	MODELAJE FÍSICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS REDUCTORES DE ENERGÍA ANTE ALUDES TORRENCIALES	50
 CAPÍTULO 4		
	RESULTADOS Y ANÁLISIS	56
4.1.	RESULTADOS.....	56
4.1.1.	<i>Comportamiento de la viscosidad con respecto a la tasa de deformación</i>	56
4.1.2.	<i>Estado del lecho erosionable cuando éste se encuentra sin reductores</i>	57
4.1.3.	<i>Fenómeno de disipación de energía</i>	58
4.1.4.	<i>Estado del lecho erosionable cuando en éste se encuentran los reductores</i>	68
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
 CAPÍTULO 5		
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1.	CONCLUSIONES	91
5.2.	RECOMENDACIONES.....	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	ANEXOS.....	96

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación de tamaños de partículas. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág.95).....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Proporciones de cada uno de los materiales en cada una de las concentraciones.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en una fila, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 6. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en una fila, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 7. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 8. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.....</i>	<i>82</i>

LISTA DE GRÁFICOS/FIGURAS

Figuras

<i>Figura 1. Fotografías aéreas del río Cerro Grande y la urbanización Tanaguareñas: 1951 (izquierda), 1998 (centro), 1999 (derecha). (Tomada de: “Ingeniería Forense y Estudio de Sitio/ Guía para la Prevención y Gestión de Riesgo”, Banesco Seguros, C.A., Pág. 32).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Partes de un torrente. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L., Pág. 1-18).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Fuerzas actuantes en una partícula suspendida. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág.96).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Movimiento en masa e individual. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L., Pág. 10-33).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Inundación de barro. (Tomado de: “Flujos Densos e Hidráulica de Ríos”. Brea, J. y Spalletti, P., Pág. 3).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6. Movimiento del flujo de lodo, concentrado y diluido. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág. 176.).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Flujo de detritos. (Tomado de: “Flujos Densos e Hidráulica de Ríos”. Brea, J. y Spalletti, P., Pág. 4.)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8. Zonas de un torrente donde se generan, transportan y depositan los flujos torrenciales. (Tomado de: “Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas”. Silva, G.).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9. Presa de rastrillo con perfiles de acero. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L., Pág. 10-17).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 10. Balanza de densidad (izquierda) y viscosímetro rotacional digital (derecha).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 11. Modelo del aparato experimental (medidas en m.).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12. Modelos de reductores de energía (medidas en cm.). De izquierda a derecha: M-1, M-2, M-3, M-4, M-5.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 13. Disposiciones sobre la Plataforma Fija (medidas en m.). De izquierda a derecha, disposición en una fila, disposición en dos filas, disposición triangular.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 14. Vista frontal y lateral del lecho, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 15. Vista frontal y lateral del lecho, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 16. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en una fila.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 17. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>59</i>
<i>Figura 18. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en forma triangular.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 19. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en una fila. ...</i>	<i>60</i>
<i>Figura 20. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en dos filas. ..</i>	<i>60</i>
<i>Figura 21. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en forma triangular.</i>	<i>60</i>

<i>Figura 22. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en una fila.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 23. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24. Impacto del flujo de barr ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en forma triangular.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en una fila.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>62</i>
<i>Figura 27. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en forma triangular.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en una fila.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 29. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en forma triangular.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 31. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en una fila.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 32. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>64</i>
<i>Figura 33. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-1 ubicados en forma triangular.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 34. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en una fila.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 35. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>65</i>
<i>Figura 36. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en forma triangular.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 37. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en una fila.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 38. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>66</i>
<i>Figura 39. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en forma triangular.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 40. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en una fila.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 41. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>67</i>
<i>Figura 42. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en forma triangular.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 43. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en una fila.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 44. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en dos filas. ...</i>	<i>68</i>
<i>Figura 45. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en forma triangular.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 46. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 47. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 48. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en una fila.</i>	<i>70</i>

<i>Figura 49. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	70
<i>Figura 50. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	70
<i>Figura 51. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</i>	70
<i>Figura 52. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 53. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 54. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</i>	71
<i>Figura 55. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 56. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 57. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en una fila.</i>	71
<i>Figura 58. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 59. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	71
<i>Figura 60. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en una fila.</i>	71
<i>Figura 61. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	72
<i>Figura 62. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	72
<i>Figura 63. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en dos filas.</i>	72
<i>Figura 64. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	73
<i>Figura 65. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	73
<i>Figura 66. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en dos filas.</i>	73
<i>Figura 67. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	73
<i>Figura 68. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	73

<i>Figura 69. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en dos filas.</i>	73
<i>Figura 70. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</i>	73
<i>Figura 71. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	73
<i>Figura 72. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</i>	73
<i>Figura 73. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	74
<i>Figura 74. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	74
<i>Figura 75. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en dos filas.</i>	74
<i>Figura 76. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	75
<i>Figura 77. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	75
<i>Figura 78. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en forma triangular.</i>	75
<i>Figura 79. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	75
<i>Figura 80. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	75
<i>Figura 81. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en forma triangular.</i>	75
<i>Figura 82. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76
<i>Figura 83. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76
<i>Figura 84. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en forma triangular.</i>	76
<i>Figura 85. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76
<i>Figura 86. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76
<i>Figura 87. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en forma triangular.</i>	76
<i>Figura 88. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76

<i>Figura 89. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</i>	76
<i>Figura 90. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en forma triangular.</i>	76
<i>Figura 91. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	77
<i>Figura 92. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	77
<i>Figura 93. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en una fila.</i>	77
<i>Figura 94. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	78
<i>Figura 95. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</i>	78
<i>Figura 96. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</i>	78
<i>Figura 97. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	78
<i>Figura 98. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</i>	78
<i>Figura 99. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</i>	78
<i>Figura 100. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	78
<i>Figura 101. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	78
<i>Figura 102. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</i>	78
<i>Figura 103. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	79
<i>Figura 104. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en una fila.</i>	79
<i>Figura 105. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en una fila.</i>	79
<i>Figura 106. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	80
<i>Figura 107. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	80
<i>Figura 108. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en dos filas.</i>	80

<i>Figura 109. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	80
<i>Figura 110. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	80
<i>Figura 111. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en dos filas.</i>	80
<i>Figura 112. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 113. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 114. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en dos filas.</i>	81
<i>Figura 115. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 116. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 117. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</i>	81
<i>Figura 118. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 119. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	81
<i>Figura 120. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en dos filas.</i>	81
<i>Figura 121. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	82
<i>Figura 122. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	82
<i>Figura 123. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en forma triangular.</i>	82
<i>Figura 124. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83
<i>Figura 125. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83
<i>Figura 126. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en forma triangular.</i>	83
<i>Figura 127. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83
<i>Figura 128. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83

<i>Figura 129. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en forma triangular.</i>	83
<i>Figura 130. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83
<i>Figura 131. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	83
<i>Figura 132. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en forma triangular.</i>	83
<i>Figura 133. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	84
<i>Figura 134. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</i>	84
<i>Figura 135. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en forma triangular.</i>	84
<i>Figura 136. Repetibilidad de los ensayos con Reductor M-1 dispuesto en una fila (Izquierda primer ensayo y derecha segundo ensayo).</i>	88

Gráficos

<i>Gráfico 1. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 25% de concentración, al transcurrir de las semanas.</i>	56
<i>Gráfico 2. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 50% de concentración, al transcurrir de las semanas.</i>	57
<i>Gráfico 3. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 75% de concentración, al transcurrir de las semanas.</i>	57

INTRODUCCIÓN

Los aludes torrenciales son fenómenos naturales, originados usualmente por lluvias prolongadas e intensas, las cuales saturan los suelos produciendo derrumbes y deslizamientos en la montaña dando origen a los flujos torrenciales, esto ocurre principalmente en la cuenca contribuyente donde se produce la mayor parte del material de arrastre, luego estos flujos son transportados a lo largo de la garganta y finalmente depositados en el cono de deyección originando inundaciones de sedimento. Las inundaciones se convierten en problema, cuando el hombre se establece sobre el cono de deyección, exponiendo sus vidas y propiedades ante las inundaciones de estos flujos torrenciales.

En los últimos años, los embates de los aludes torrenciales han causado centenares de daños materiales y pérdidas humanas, como en el caso de Nicaragua en octubre de 1998, Venezuela en diciembre de 1999 y uno de los más recientes el ocurrido en Filipinas en febrero de 2006. Es por esto que surge la necesidad de estudiar la manera más efectiva de mitigar los daños así como comprender la dinámica de los aludes torrenciales.

Una manera de disminuir el riesgo en las zonas densamente pobladas es colocando obras de control tanto en la garganta como en el cono de deyección del torrente. Una de estas obras de control son los reductores de energía, que normalmente se ubican en las fosas de sedimentación de las presas o en las entradas de los conos de deyección. En esta investigación se estudia el caso de los reductores de energía ubicados en la entrada del cono de deyección, cuya inserción tiene como finalidad localizar fenómenos de erosión y disminuir la capacidad destructiva de los flujos torrenciales mediante disipación de energía. La forma, e incluso la disposición de estas estructuras puede determinar el área afectada por un determinado evento, es por eso que surgen las siguientes interrogantes: ¿Cuál forma geométrica de los reductores de energía sería más eficiente?, ¿Cuál configuración espacial de los reductores de energía proporcionaría un funcionamiento óptimo?, ¿Cómo se

comportarían las estructuras reductoras de energía ante eventos extremos?, ¿Cómo influye la densidad del flujo en el comportamiento de los reductores?

Para responder estas interrogantes y debido a la falta de información sobre los reductores de energía, es necesario realizar un experimento aproximado en un modelo físico que permita evaluar cualitativamente el comportamiento de los reductores de energía ante aludes torrenciales, siendo este el propósito principal de esta investigación.

Una de las principales motivaciones que impulsaron la realización de esta investigación, es que con este modelaje físico se logrará predecir el comportamiento del flujo en la parte baja del torrente, logrando seleccionar la forma geométrica y la configuración espacial de los reductores de energía que garantizará la reducción del efecto del desastre en zonas densamente pobladas, proporcionando el resguardo de vidas humanas y disminución de los daños sobre las propiedades de los habitantes de la zona de afectación, también con este modelaje se contribuye con nuevos conocimientos en el área de Ingeniería Hidráulica, siendo esta otra motivación para la realización de esta investigación .

La naturaleza de esta investigación es de tipo experimental, el diseño de dicha investigación consta de dos etapas. La primera etapa consiste en la búsqueda documental y la segunda etapa constituye la parte experimental. La experimentación se realiza mediante un modelaje físico en el cual se empleará un aparato experimental que representa la parte baja de una cuenca, cinco modelos de reductores ubicados en tres configuraciones distintas sobre un fondo erosionable y dos tipos de lodo.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los eventos meteorológicos extremos ocurridos en los últimos años en el mundo han causado grandes desastres, siendo los aludes torrenciales (generados por los deslizamientos de tierra e inundaciones) uno de los más catastróficos porque al llegar a los asentamientos urbanos causan muchas pérdidas de vidas, como el ocurrido en Nicaragua en Octubre de 1998, en el cual murieron 1000 personas aproximadamente y uno de los más recientes, el que sucedió en Filipinas en Febrero de 2006, donde 1500 personas aproximadamente quedaron sepultadas bajo el barro.

En Venezuela también han ocurrido catástrofes similares como la del estado Vargas en Diciembre de 1999, con precipitaciones que alcanzaron 911 mm. en 3 días¹, que ocasionaron la crecida de los ríos los cuales descendían por pendientes mayores a 30°. Esto sumado a que los suelos se encontraban saturados, produjo numerosos flujos superficiales, desprendimiento de la capa vegetal, arrastre de sedimentos y formación de flujos de lodos, materiales vegetales y troncos, en un flujo que fue aumentando su densidad por la mezcla con material fino, hasta levantar rocas de gran tamaño. Este proceso cambió la geografía, desapareció playas y modificó el frente costero (ver Figura 1), produjo severos daños en los asentamientos urbanos y cerca de 15000 pérdidas de vidas humanas²; es por esto que surge la necesidad de estudiar la manera más efectiva de reducir el riesgo en zonas densamente pobladas así como comprender la dinámica de los aludes torrenciales.

¹ Genatios, C. y Lafuente, M. (2003). Lluvias Torrenciales en Vargas, Venezuela, en diciembre de 1999, Protección Ambiental y Recuperación Urbana. Boletín Técnico IMME, 41 (2-3); 51.

² López, J. citado en "Ingeniería Forense y Estudio de Sitio/ Guía para la Prevención y Gestión de Riesgo, Banesco Seguros, C.A".



Figura 1. Fotografías aéreas del río Cerro Grande y la urbanización Tanaguareñas: 1951 (izquierda), 1998 (centro), 1999 (derecha). (Tomada de: “Ingeniería Forense y Estudio de Sitio/ Guía para la Prevención y Gestión de Riesgo”, Banesco Seguros, C.A., Pág. 32)

Los aludes torrenciales son flujos de agua con alta concentración de lodo, material granular e incluso escombros (flujos de escombros) producidos por lluvias intensas que tienen un gran potencial destructivo, producto de la gran energía del flujo, la cual a su vez proviene principalmente de las pendientes pronunciadas, típicas de las cuencas de montaña y de la presencia de materiales sólidos transportados por la corriente. Estos fenómenos pueden causar enormes daños al alcanzar los conos de deyección, donde normalmente se concentra la población.

Una de las formas de disminuir el riesgo en estas zonas es colocando obras de control en los cauces, tanto en la garganta como en los conos de deyección. Actualmente existen en el estado Vargas obras de control en ríos y en algunas quebradas que fueron construidas en su mayoría después del evento de 1999, las cuales presentan un alto grado de sedimentación luego del evento de febrero de 2005; así lo manifiesta un informe realizado por el Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV), y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmicas (FUNVISIS) y donde, por medio de una inspección ocular a 18 presas visitadas, se observó que 10 de ellas (el 56%) estaban totalmente sedimentadas, algunas con el depósito a nivel de la cresta del vertedero, lo cual indica la elevada producción de sedimentos que tienen las cuencas de

Vargas ³. La falta de mantenimiento de estas estructuras obliga a pensar en nuevas estructuras adicionales que disminuyan los daños que podrían ocasionar futuros eventos al llegar a las zonas de depósito aguas arriba de estas obras.

Unas de estas estructuras de control son los reductores de energía (mudflow breakers) que normalmente se ubican en las fosas de sedimentación de las presas o en las entradas de los conos de deyección con la finalidad de localizar los fenómenos de erosión y de reducir la capacidad destructiva de los flujos de lodos o flujos de escombros mediante disipación de energía. En esta investigación se estudiará el caso donde los reductores de energía se ubican en la entrada de los conos de deyección, donde la implantación de estas estructuras permite reducir los daños en la parte baja de la cuenca.

La forma, e incluso la disposición de los reductores de energía puede determinar el área afectada por un determinado evento; adicionalmente una construcción inadecuada puede acarrear más problemas que soluciones cuando la misma sea solicitada o incluso esté funcionando en condiciones hidráulicas normales. Es por eso que surgen las siguientes interrogantes: ¿Cuál forma geométrica de los reductores de energía sería más eficiente?, ¿Cuál configuración espacial de los reductores de energía proporcionaría un funcionamiento óptimo?, ¿Cómo se comportarían las estructuras reductoras de energía ante eventos extremos?, ¿Cómo influye la densidad del flujo en el comportamiento de los reductores?

Para responder estas interrogantes es importante realizar un modelaje físico de manera de evaluar su comportamiento ante eventos extraordinarios, así como determinar cuál forma geométrica y cuál configuración espacial es más efectiva para mayor disipación de energía.

³ Instituto de Mecánica de los Fluidos (IMF) de la Universidad Central de Venezuela (UCV) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmicas (FUNVISIS). (2005). Evaluación y Diagnóstico del Comportamiento de las Canalizaciones y Presas de Control de Sedimentos en el Estado Vargas con Motivo de las Lluvias de Febrero del 2005.

1.2. MARCO REFERENCIAL

Las investigaciones relevantes que se han realizado vinculadas a la problemática estudiada son:

- Aguirre, Moncada, Guatarasma y Suárez. (2004), analizaron las propiedades de los lodos, utilizando mezclas homogéneas, de arena y arcilla, saturadas en agua, variando la concentración en volumen entre 0,08 y 0,46 para la arena y entre 0,16 y 0,63 para la arcilla. Se midieron la viscosidad, el esfuerzo cedente y la tasa de deformación para las distintas mezclas mediante el uso de un viscosímetro marca Rheomat modelo 30, obteniendo como resultado que el esfuerzo cedente es inversamente proporcional a la concentración de arena y directamente proporcional a la concentración de arcilla. También midieron la velocidad de avance de onda, variaciones de profundidad y velocidades de un flujo de lodo que circulaba por un canal de plexiglás de 4m. de longitud, con pendientes entre 0,046 y 0,16, obteniendo que el flujo establecido en el canal (uniforme y no permanente) mostró ser un flujo de Bingham.
- Blanco. (2003), propone un protocolo para la preparación de muestras de lodo, donde se plantean una serie de pasos que aseguran la repetibilidad en la preparación de muestras. Este protocolo contempla solo volúmenes pequeños de mezclas de lodo, aproximadamente un (1) galón.
- Armanini, Della Putta y colaboradores. (s.f.), proponen un criterio para el diseño de reductores de energía mediante aproximaciones teóricas y experimentales. Para ello realizaron una serie de ensayos donde se evaluaba: la disipación eficiente de energía de los reductores ubicados a la entrada del cono de deyección en función de las características del flujo (utilizando concentraciones de lodo de 24%, 28% y 40%) y geometría de los reductores (mediante cuatro modelos de reductores), distancia mínima a la que debían ser colocados los reductores y las fuerzas que actuaban sobre cada reductor. Obteniendo como

resultado que si el ángulo de desviación de los reductores es bastante pequeño, se forman dos chorros laterales, y si el ángulo de desviación es bastante grande, un tercer chorro se forma. También se obtuvo una fórmula empírica para la determinación de la distancia mínima de ubicación de los reductores y un parámetro denominado coeficiente de resistencia de las estructuras.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general:

- Evaluar cualitativamente el comportamiento de los reductores de energía ubicados a la entrada del cono de deyección, ante aludes torrenciales a través de la realización de un modelaje físico.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Diseñar y construir un canal de pendiente variable con una plataforma fija de fondo erosionable.
- Analizar cambios en el comportamiento de los reductores de energía cuando se modifican su forma geométrica, así como la configuración espacial de los conjuntos de estas estructuras en la zona de ubicación de las mismas, tomando en cuenta las características del fluido.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

MARCO TEÓRICO

2.1. Torrente

Los torrentes según L. Suárez (1993)⁴ son cursos de agua de zonas montañosas que se caracterizan por tener fuertes pendientes longitudinales, mayores al 5%, las cuales son irregulares, alta rugosidad de fondo y gran capacidad de transporte de sedimentos. Los cauces de torrentes están formados por materiales gruesos: peñones, cantos rodados, grava y arena, entremezclados.

Los caudales de estos torrentes son generalmente muy variables, en épocas secas los caudales son extremadamente pequeños pero en temporadas lluviosas presentan grandes caudales repentinos. En el momento de las avenidas desarrollan grandes velocidades y turbulencia de fondo con capacidad para transportar materiales de gran diámetro (J. Suárez, 2001)⁵.

J. Suárez manifiesta que los cauces de alta montaña presentan entre otros los siguientes elementos que dificultan su análisis:

- El flujo en canales demasiado rugoso no incluye efectos de viscosidad por lo tanto el número de Reynolds no es aplicable.
- Los bordes de los canales son difíciles de definir ya que ellos incluyen una gran cantidad de caídas y curvas que impiden que pueda considerarse flujo uniforme sobre una cierta longitud, el flujo uniforme en un canal de alta montaña solo se obtiene en un sentido promedio.

⁴ Suárez, L. (1993). Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas. MARNR.

⁵ Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander.

- La pendiente de fondo es difícil de definir, debido a que aparecen elementos de gran escala que forman protuberancias en el lecho.

2.1.1. Partes de un torrente

En la mayor parte de los torrentes se pueden distinguir tres partes bien diferenciadas; en cada una de las cuales se producen fenómenos diferentes (ver Figura 2), según L. Suárez (1993)⁶, esas partes son:



Figura 2. Partes de un torrente. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L. Pág. 1-18).

2.1.1.1. La Cuenca Contribuyente: es la parte más alta y más extensa del torrente y tiene forma cónica, similar a la que tendría un embudo cortado por la mitad; allí es

⁶ Suárez, L. (1993). Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR.

donde el torrente recoge sus aguas durante las lluvias. Esta cuenca tiene fuertes pendientes, por lo que pueden formarse en ella grandes deslizamientos de tierra.

2.1.1.2. La Garganta: generalmente está constituida por un cauce más angosto y profundo, situada aguas abajo de la cuenca. Por la garganta fluye el agua y los sedimentos provenientes de la cuenca hacia la planicie de aguas abajo. Este tramo identifica lo que comúnmente se denomina torrente.

2.1.1.3. El Cono de Deyección: también llamado abanico aluvial, recibe este nombre porque en la desembocadura del torrente en la planicie, la pendiente se reduce bruscamente, disminuyendo así la velocidad del flujo, originando la sedimentación de los materiales transportados, los cuales se acumulan formando una silueta cónica o en abanico.

En cada creciente los bloques de mayor tamaño se depositan primero, hacia la parte superior del cono, luego (hacia aguas abajo) los cantos rodados, seguidamente la grava y finalmente la arena. Pero como las crecientes son de diferentes magnitudes, una creciente de gran caudal puede empujar todos los materiales hacia aguas abajo, mientras que otra menor, tenderá a depositar sus arrastres sólidos más aguas arriba. Como resultado, es común encontrar en los conos de deyección una mezcla de materiales de diferentes tamaños, sin una estratificación definida.

Todas las áreas de la cuenca contribuyente y las orillas y fondo del cauce producen continuamente sedimentos que la corriente transporta y luego deposita. La variabilidad espacial de los sedimentos es un resultado de la influencia del clima, vegetación, relieve, geología y los procesos antrópicos de erosión.

2.2. Origen de los sedimentos

La mayor parte de los ríos y torrentes transportan material sólido junto con el agua. En general, el volumen sólido transportado se incrementa de manera muy importante durante las crecientes.

L. Suárez (1993)⁷, manifiesta que las principales causas que contribuyen a la formación del caudal sólido son las siguientes:

2.2.1. La erosión de la cuenca

Los cambios de temperatura y humedad, lluvia, viento y la intervención del hombre, etc., van despedazando y destruyendo rocas (desprendimiento de la roca en forma de cuña), cuyos fragmentos caen por las pendientes transportados por la escorrentía, las corrientes concentradas y los torrentes hacia los cauces de agua. La erosión de la cuenca ocurre en menor grado que la erosión del cauce.

2.2.2. La erosión del cauce

Los cambios de dirección del cauce ocasionan el choque alternado del flujo contra sus márgenes, arrancando materiales de las mismas, los cuales se incorporan a la corriente.

La fuerza cortante que ejerce el flujo en el fondo, puede tener la energía suficiente como para arrastrar las partículas del mismo, especialmente durante las crecidas, actuando sobre los materiales sueltos que constituyen el fondo de los cauces, incorporando estas partículas al flujo.

⁷ Suárez, L. (1993) Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR.

2.2.3. Los deslizamientos de terreno

En algunas zonas de la cuenca alejadas de los cauces, pueden producirse deslizamientos de terreno inducidos por la presión hidrostática asociada a la saturación de los suelos y rocas, efecto que sumado a la disminución de los parámetros resistentes de los materiales a consecuencia de la meteorización y a las fuertes pendiente, traen como resultado que se sobrepase la resistencia al deslizamiento.

En los márgenes de los cauces pueden producirse desplazamientos en masa de grandes volúmenes, a causa de la erosión producida por el propio torrente. Los deslizamientos pueden suministrar grandes cantidades de sólidos a los cursos de agua y en ciertos casos son los responsables de la formación de los aludes torrenciales.

2.3. Propiedades de los sedimentos

Los sedimentos pueden ser cohesivos y no cohesivos. Los sedimentos no cohesivos comprenden los cantos y bloques, gravas y arenas y los no cohesivos son esencialmente mezclas de limos y arcillas, la clasificación de acuerdo al tamaño se observa en la Tabla 1. Existen diferencias entre los dos grupos de sedimentos y su interacción con el flujo.

En los sedimentos no cohesivos la principal fuerza de resistencia a la erosión es el peso sumergido de los sedimentos (peso del grano menos la fuerza de flotación), mientras que en los sedimentos cohesivos las fuerzas netas de atracción entre partículas y las fuerzas electroquímicas controlan la resistencia a la erosión. Estas mismas fuerzas controlan el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones de sedimentos finos (J. Suárez, 2001)⁸.

⁸ Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander.

Tabla 1. Clasificación de tamaños de partículas. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág.95)

Partículas	Rango de tamaño en mm.
Cantos	Más de 256
Guijarros	64 a 256
Grava	2 a 64
Arena	0,064 a 2
Limos	0,004 a 0,064
Arcillas	Menos de 0,004

El movimiento de las partículas depende de sus características físicas tales como tamaño, forma y densidad.

2.4. Transporte de sedimentos

En las montañas, para que se produzca el movimiento de los granos en el flujo, es necesaria una fuerza para balancear el peso sumergido de las partículas sólidas y así evitar que se depositen. Según J. Suárez (2001)⁹, las partículas sólidas llevadas por un flujo pueden ser clasificadas en:

2.4.1. Carga de fondo: la carga de fondo referente a los granos sólidos cuyo peso sumergido es soportado por la fuerza de disipación o de contacto. La carga de fondo es el material demasiado grueso para ser soportado dentro del flujo de agua por un periodo apreciable de tiempo. El transporte de fondo, incluye todos los tamaños mayores de 0,064 mm. transportados por el agua.

⁹ Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander.

La carga de fondo es alimentada por los sedimentos que conforman el lecho y por los materiales gruesos que son transportados desde la cuenca, por procesos de remoción en masa. La carga de fondo puede moverse rodando, deslizándose o por saltación debido a las irregularidades de fondo.

Generalmente la proporción de carga de fondo es menor del 25 % de la carga total transportada según McCuen en Suárez (2001).

2.4.2. Carga en suspensión: las partículas suspendidas son transportadas y mantenidas dentro del flujo por un proceso de mezcla turbulenta.

La carga de suspensión consiste en partículas de diámetro menor a 0,064 mm., las cuales se transportan suspendidas dentro del flujo. Estas partículas suspendidas están sujetas a la fuerza de gravedad (F_g) y la fuerza de flotación (F_f). A su vez el perfil de velocidades genera un movimiento de rotación (M) (ver Figura 3).

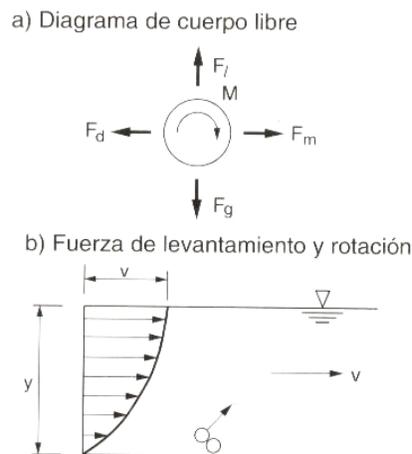


Figura 3. Fuerzas actuantes en una partícula suspendida. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág.96).

2.4.3. Carga disuelta: consiste en materiales transportados en solución. Generalmente, se trata de partículas de arcillas o limos muy finos.

Wan, Z. y Wang, Z (1994)¹⁰, añade un tipo de transporte de partículas pero para el caso particular de flujos hiperconcentrado, el cual se describe a continuación:

2.4.4. Carga neutral flotante: en un flujo con presencia de arcilla y limos, la mezcla agua-sedimento es un fluido no newtoniano con esfuerzo cedente. Una parte del sedimento puede ser soportado por la fuerza cedente y no asentarse. Tal parte del sedimento es llamado carga neutral flotante.

2.5. Movimientos de masa

Es el transporte de grandes volúmenes de material litológico, restos vegetales y/o escombros a lo largo de las pendientes por acción de la gravedad, del agua y/o del hielo. El movimiento de masas ocurre cuando el esfuerzo cortante supera la resistencia al corte del suelo. Esto puede ocurrir al aumentar el esfuerzo cortante (sismos, variaciones morfológicas desfavorables, etc.) o al disminuir la resistencia al corte del suelo (saturación, meteorización, etc.), (Escobar, 2003)¹¹.

2.5.1. Procesos que facilitan los movimientos de masas

La gravedad, proporciona la energía para que el movimiento pendiente abajo de las masas de suelo se produzca. No obstante, el movimiento se favorece por la acción del agua, por la geometría de los depósitos y por la naturaleza de los materiales. Es por ello que según L. Suárez (1993)¹² los procesos que influyen la inestabilidad son:

¹⁰ Wan, Z. y Wang, Z (1994). Hyperconcentrated Flow. Beijing: IAHR.

¹¹ Escobar, G. (2003). Manual de Geología para Ingenieros. Disponible: http://www.geocities.com/manualgeo_00/ [Consulta: 2006, noviembre 06]

¹² Suárez, L. (1993) Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR.

2.5.1.1. Resecamiento del suelo. Si el exceso de agua provoca el deslizamiento, también la falta de agua. Al secarse el suelo, se contrae y se producen disyunciones perpendiculares a la dirección en que los vasos capilares van perdiendo agua.

2.5.1.2. Saturación del material con agua. Las fuertes lluvias originan la salida del aire de los poros, destruyendo la tensión superficial y reduciendo la cohesión de la masa. Simultáneamente con la saturación del suelo, el agua de los poros entra bajo presión y trata de apartar los granos individuales y las unidades de roca disminuyendo la fricción interna del material.

2.5.1.3. Modificaciones por erosión. Altera la geometría del depósito, venciendo la pendiente crítica del talud o provocando la pérdida del pie del talud. También la deposición o sobrecarga de materiales erosionados interviene en la estabilidad de una masa al modificar la pendiente o al generar esfuerzos adicionales en su interior que alteren la estabilidad de los materiales.

2.5.1.4. Variaciones del material y otros. Como en los casos de cambios en la naturaleza del suelo (por meteorización o por alteración natural o artificial de los materiales), esfuerzos dinámicos (sismos, tráfico, etc.), sobrecargas artificiales e intervención del hombre (talas, construcciones, etc.).

2.5.2. Clasificación de los movimientos de masas

Es importante una clasificación que explique los mecanismos de deslizamientos de suelo (flujos superficiales) y roca, ya que los fenómenos naturales no se producen siempre de una misma manera regular y uniforme, bajo condiciones simples y homogéneas. Con una clasificación capaz de abarcar todas las especies y géneros del fenómeno, se pueden elaborar modelos y teorías útiles en el análisis y cálculo de los fenómenos que han de ser prevenidos o corregidos.

Según J. Suárez (1998)¹³ la clasificación es la siguiente:

2.5.2.1. Caído: en los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte, y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando.

El movimiento es muy rápido o extremadamente rápido y puede, o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material.

2.5.2.2. Inclinación o volteo: este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad, y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas.

2.5.2.3. Reptación: consiste en movimientos muy lentos o extremadamente lentos del suelo superficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno.

Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos usualmente muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.

2.5.2.4. Deslizamiento: este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla.

¹³ Suárez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Editorial Ingeniería de Suelos LTDA.

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y translacionales o planares.

2.5.2.5. Esparcimiento lateral: en los esparcimientos laterales el modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo. Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La rata de movimiento es por lo general extremadamente lenta.

2.5.2.6. Flujo: en un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos, de suelo o tierra.

Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse, en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está, generalmente, relacionada con la saturación de los materiales superficiales. Algunos suelos absorben agua fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo.

Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos no consolidados:

2.5.2.6.1. Flujo en roca: los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de líquidos viscosos.

Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser de rápida a muy rápida.

2.5.2.6.2. Flujo de escombros (Detritos): por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento.

El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea.

El flujo típico de detritos es una onda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas ondas menores que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo.

2.5.2.6.3. Flujo de suelo: los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia. En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos, por lo general pequeños pero de velocidades altas.

2.5.2.6.4. Flujos de lodo: dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se

puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad.

Un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación.

La zona de acumulación es generalmente, un área de menor pendiente en la cual el flujo pierde velocidad y forma un cono de deyección.

2.5.2.7. Avalanchas: en las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo”. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un pre-requisito para que ocurran.

El movimiento de las avalanchas se puede relacionar con “flujo turbulento de granos”. Este mecanismo no requiere de la presencia de una fase líquida o gaseosa y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

2.6. Aludes torrenciales

Son flujos extraordinarios de agua con lodos y detritos, en los que el volumen de los sedimentos es superior al del agua (L. Suárez (1993) ¹⁴ toma por referencia un contenido de agua inferior a 0,50 m³ por m³ de masa), se caracterizan por poseer altas viscosidades, gran

¹⁴ Suárez, L. (1993) Presas de corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR.

capacidad de arrastre en zonas de alta pendiente y en zonas de baja pendiente se depositan debido a que el flujo va perdiendo energía a lo largo de su recorrido.

L. Suárez también explica que los aludes torrenciales presentan un mecanismo de transporte en masa que se caracteriza porque, una vez detenidas éstas, los bloques más grandes aparecen acumulados en la parte frontal, a diferencia del transporte individual, en el que ocurre lo contrario. (Ver Figura 4).

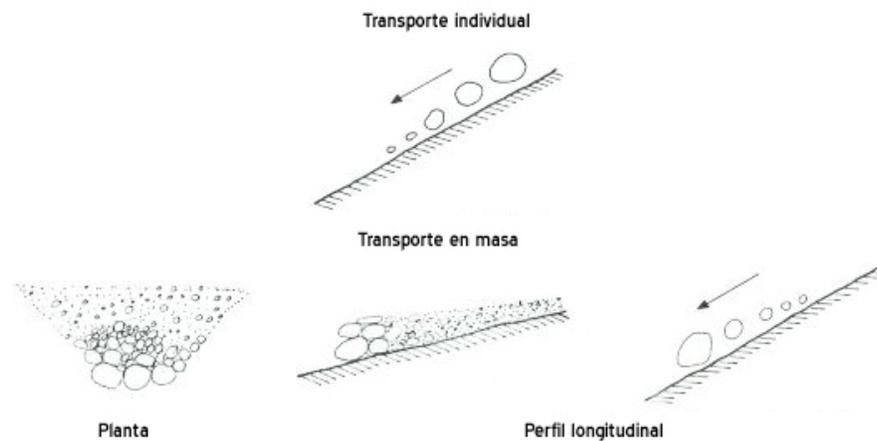


Figura 4. Movimiento en masa e individual. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L., Pág. 10-33)

Debido que el flujo posee grandes cantidades de partículas de sedimentos, a medida que es transportado a lo largo del cauce, éste va cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo. A los flujos con estas características se les denomina flujos hiperconcentrados (Brea y Spalletti, 2003)¹⁵.

La hidráulica del flujo (desplazamiento y deposición de los sedimentos) está gobernada por el volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento proveniente

¹⁵ Brea, J. y Spalletti, P. (2003). Flujos Densos e Hidráulica de Ríos. Primer simposio regional sobre Hidráulica de ríos.

de las laderas de la montaña). Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, la distribución granulométrica y del contenido de arcillas.

2.6.1. Modelos básicos de movimientos de aludes torrenciales

Según Wan, Z. y Wang, Z (1994)¹⁶ los modelos básicos de movimiento de aludes torrenciales son:

2.6.1.1. Carga suspendida + Carga de fondo: el movimiento de carga suspendida consume solamente la energía turbulenta y no causa resistencia adicional para el flujo, pero la carga de fondo si lo hace. Los flujos hiperconcentrados ocurren cuando las lluvias torrenciales fuertes causan la erosión de las altiplanicies y trae mucho sedimento fino en ríos.

2.6.1.2. Carga suspendida + Carga neutral flotante: si los flujos hiperconcentrados presentan fuerza cedente una parte de los sedimentos finos se mueven con carga neutral flotante, mientras el sedimento grueso es transportado como carga suspendida y carga de fondo.

2.6.1.3. Carga neutral flotante: si un flujo lleva bastante material de arcilla, la mezcla presenta una fuerza cedente fuerte y la mayoría del sedimento en el flujo pertenece a la carga neutral flotante.

¹⁶ Wan, Z. y Wang, Z (1994). Hyperconcentrated Flow. Beijing: IAHR.

2.6.2. Factores importantes que controlan los modelos de movimientos de aludes torrenciales

Según Wan, Z. y Wang, Z (1994)¹⁷, estos factores son:

2.6.2.1. Origen de los sedimentos. Los flujos hiperconcentrados transportan una gran cantidad de sedimentos, debe haber una fuente abundante de sedimento en el área de flujo hiperconcentrado. Zonas de pobre capa vegetal se ven susceptibles a la erosión producto de las lluvias torrenciales causantes de los movimientos en masa. Las erupciones de los volcanes derriten la nieve y el hielo, haciendo fluir el agua fuera del cráter, iniciando un Lahar (flujo de escombros volcánicos).

2.6.2.2. Componentes del sedimento. Los modelos de flujos hiperconcentrados dependen, en gran medida de las propiedades reológicas de las mezclas agua-sedimento. El comportamiento reológico de las mezclas depende de la distribución de tamaños y composición mineral del sedimento.

2.6.2.3. Factores hidráulicos. Alta velocidad, intensidad turbulenta y pendiente de energía son necesarias para iniciar y mantener el flujo hiperconcentrado.

2.6.3. Clasificación de Aludes Torrenciales

2.6.3.1. Según factor generador

Los aludes torrenciales pueden ser divididos en dos tipos: volcánico primario y volcánico secundario o no volcánico¹⁸. En el caso de los **volcánicos primarios** (asociados con erupciones), pueden ser ocasionado por:

¹⁷ Wan, Z. y Wang, Z (1994). Hyperconcentrated Flow. Beijing: IAHR.

¹⁸ <http://www.geofisica.unam.mx/ineter/lahares1.php?doc=6>. [Consulta: 2006, Agosto 16].

1. Mezcla de escombros de roca y agua en las laderas de un volcán.
2. Explosiones volcánicas que desaguan lagunas cratéricas.
3. Aguaceros torrenciales que mezclan agua con material piroclástico recién depositado u otro material no consolidado.
4. Ocurrencia simultánea de tormentas y columnas eruptivas.
5. Flujos piroclásticos al ingresar a ríos e incorporar agua.
6. Descongelamiento por derretimiento de la cubierta de nieve por alta temperatura expulsada por volcanes.

En el caso de los **volcánicos secundarios** (asociados indirectamente con erupciones) o **no volcánicos** pueden ser ocasionados por:

1. Fuertes lluvias responsables de la mayor parte de los deslizamientos de taludes inestables.
2. Lluvia de piroclastos asociada con un incremento en el coeficiente de escorrentía.
3. Transformación de avalanchas de escombros saturadas en agua.
4. Destrucción repentina de represas formadas por flujos de lava, avalanchas de escombros, flujos piroclásticos y desbordamiento o derrumbe de bordes cratéricos.
5. Iniciados por sismos que producen deslizamientos de las laderas en cauces naturales, y los materiales de dichos deslizamientos alimentan el caudal sólido de la corriente, o forman presas naturales que luego se rompen y producen olas de gran magnitud.

2.6.3.2. Según concentración volumétrica

Según Julien y León (2000)¹⁹, pueden clasificarse en:

2.6.3.2.1. Inundaciones o crecidas de barro, son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones de sedimento en volumen (C_v) de hasta un 40%.(ver Figura 5).



Figura 5. Inundación de barro. (Tomado de: “Flujos Densos e Hidráulica de Ríos”. Brea, J. y Spalletti, P., Pág. 3)

2.6.3.2.2. Flujos de lodo, se caracterizan por una concentración de limos y arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa (ver Figura 6), que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño. La C_v de la matriz del fluido en flujos de barro se encuentra en un rango de 45% y 55% (O’Brien, 1986)²⁰. Los flujos de barro presentan altas viscosidades y esfuerzos cedentes, pueden viajar largas distancias sobre leves pendientes a velocidades lentas y

¹⁹ Julien, P. y León, C. (2000). Mud floods, Mudflows and Debris Flows. Classification, Rheology and Structural Design. Jornadas de investigación JIFI 2000.

²⁰ O’Brien, J. (1986). Physical Process, Rheology and Modeling of Mudflows.

dejan depósitos en forma de lóbulos sobre el abanico aluvial. Extremos eventos de flujo de lodo pueden degenerar en inundaciones de barro.

Los flujos de lodo son caracterizados por una fase sólida granular y fluido intersticial. El fluido intersticial es de agua clara o una mezcla de agua y partículas sólidas finas, influenciando con sus propiedades electromecánicas el desarrollo reológico de la mezcla (Armanini, Dalrí, Fraccarollo, Larcher y Zorzín, s.f.)²¹.

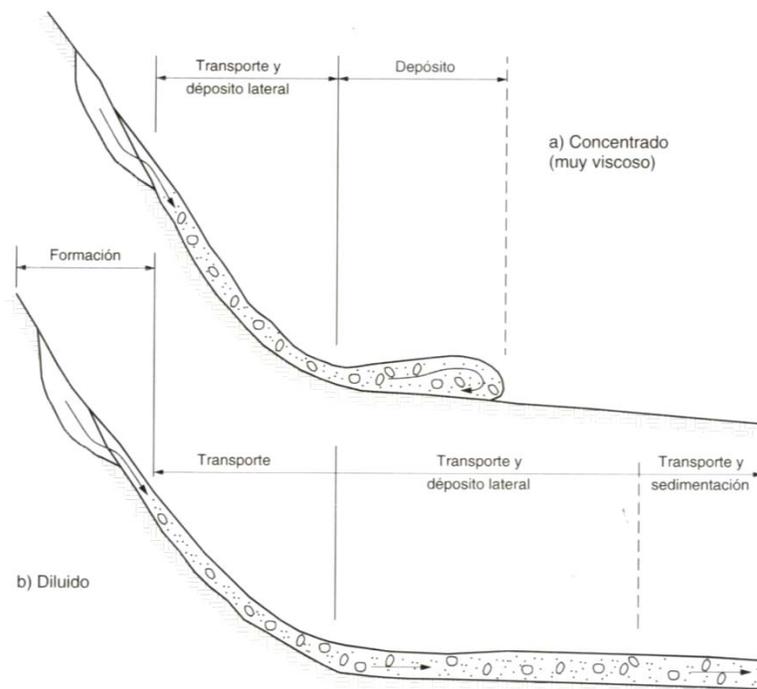


Figura 6. Movimiento del flujo de lodo, concentrado y diluido. (Tomada de: “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Suárez, J., Pág. 176.)

2.6.3.2.3. Flujos de detritos, se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc., donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía (ver Figura 7).

²¹ Armanini, A., Dalrí, C. y colaboradores. (s.f). Experimental Analysis of the General Features of Uniform Mud-flow. Trento.



Figura 7. Flujo de detritos. (Tomado de: “Flujos Densos e Hidráulica de Ríos”. Brea, J. y Spalletti, P., Pág. 4.)

Los flujos de detritos son mucho menos fluidos que las crecidas de barro. La matriz de fluido viscoso es pequeña debido a la pequeña concentración de sedimentos finos.

El proceso de segregación (la separación material clástico del fluido intersticial) puede ocurrir durante la propagación en la garganta del torrente, así como también durante el depósito sobre el abanico aluvial dejando un flujo de lodo o sólo agua clara fluyendo aguas abajo (Arattano y Franzi, 2004)²².

2.6.4. Causa de las altas concentraciones

Según Hessel, R. (2002)²³ las causas de las altas concentraciones son:

2.6.4.1. Pendiente empinada y material erosionable

La presencia de material erosionable sobre pendientes empinadas puede por lo tanto ser una de las más importantes causas de las altas concentraciones. El ángulo medio de

²² Arattano, M. y Franzi, L (2004). Analysis of Different Water-Sediment Flow Processes in a Mountain Torrent. Natural hazards and earth system sciences.

²³ Hessel, R. (2002). Modelling Soil Erosion in a Small Catchment on the Chinese Loess Plateau. Disponible en : <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2002-1119-144142/inhoud.htm> [Consulta: 2006, Julio 03]

pendientes inclinadas donde el agua tendrá alta energía, el flujo de agua es conducido por energía potencial. Además, para el material erosionable, el ángulo de la pendiente puede ser cercano al ángulo de fricción interna, de modo que tal material estará cerca de moverse bajo la influencia de la gravedad solamente.

2.6.4.2. Características del material

Estructura del material, sales solubles y el mineral de arcilla son muy sensibles a cambios en contenido de agua, de modo que puede causar el colapso de la estructura del material.

2.6.4.3. Clima

La ocurrencia de fuertes precipitaciones en verano puede además ser un factor importante en causar el desarrollo de flujos hiperconcentrados.

2.6.5. Consecuencias de las altas concentraciones

Las altas concentraciones pueden tener múltiples efectos en el desarrollo del flujo y en la capacidad de transporte. Estos efectos no pueden realmente ser separados ellos ocurren simultáneamente. Según Hessel, R. (2002)²⁴ las consecuencias de las altas concentraciones son:

2.6.5.1. Densidad del fluido

La densidad del fluido aumenta notablemente con el incremento de la concentración de sedimento. La alta densidad del flujo tiene mayor energía potencial que el agua clara. Si

²⁴ Hessel, R. (2002). Modelling Soil Erosion in a Small Catchment on the Chinese Loess Plateau. Disponible en : <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2002-1119-144142/inhoud.htm> [Consulta: 2006, Julio 03]

todas las propiedades del flujo pudieran permanecer iguales, podría resultar en un incremento en velocidades del flujo en comparación al agua clara.

2.6.5.2. Viscosidad

Para el agua clara, la viscosidad es una función de la temperatura solamente. La viscosidad de un fluido incrementa con el aumento en la concentración de sedimentos, muchos autores como Wan, Z y Wang, Z. (1994)²⁵ mostraron que las partículas de arcillas tienen más influencia que otras partículas, de modo que la distribución del tamaño del grano y la mineralogía de la arcilla deben ser tomadas en cuenta.

2.6.5.3. Velocidad de transporte

Incrementando la concentración de sedimento, de algún modo, hay más efectos sobre la velocidad de sedimento. Con un incremento en la concentración, la velocidad de sedimento disminuirá debido a diversos efectos (Wan, Z. y Wang, Z., 1994).

La energía necesaria para soportar la carga de sedimento suspendida es proporcionada por la turbulencia. Esto significa que la turbulencia decrecerá con el incremento de carga de sedimento. Mas energía es así usada para el transporte de sedimento y menor por turbulencia.

Cuando el flujo es un flujo Bingham este tiene esfuerzo cedente. Las partículas suspendidas ejercen un esfuerzo sobre el fluido debido a la gravedad, si este esfuerzo esta por debajo del esfuerzo cedente del fluido los sedimentos no se asentarán del todo, a esta carga se le es llamada carga neutral flotante.

²⁵ Wan, Z. y Wang, Z (1994). Hyperconcentrated Flow. Beijing: IAHR.

2.6.5.4. Capacidad de transporte

En los flujos hiperconcentrados, la capacidad de transporte incrementa con el aumento de la concentración y por consecuencia la densidad del fluido aumenta.

2.6.5.5. Velocidad del flujo

El alto contenido de sedimento tiene influencia sobre la velocidad del flujo, así lo demuestran:

Govers citado en Hessel (2002), quien encontró un significativo incremento en la velocidad del flujo con un aumento en el contenido de sedimento para el flujo de tierra para arenas con un d_{50} de 218 y 1098 μm . Los flujos con una concentración volumétrica de 32% tenían una velocidad 40% más alta que el agua clara.

Einstein & Chien (Hessel, 2002), condujeron una serie de experimentos con arena (tamaño del grano entre 0.274 y 1.3 mm.) y también encontraron que el promedio de velocidad aumentaba con el aumento del contenido de sedimento.

2.6.6. Zonas de generación, transporte y depósito de los aludes torrenciales

A continuación; en la Figura 8, se presenta un esquema donde se muestran los tramos o zonas de un torrente donde se generan, transportan y depositan los flujos torrenciales (Silva, 2003)²⁶:

²⁶ Silva, G. (2003). Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas. Disponible: <http://www.geocities.com/gsilvam/lahares.htm> [Consulta: 2006, Agosto 30]

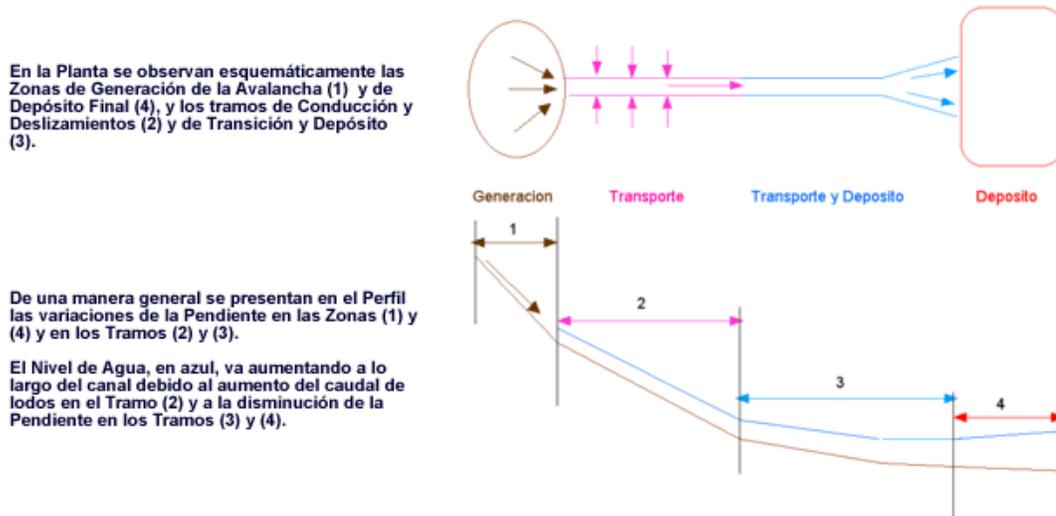


Figura 8. Zonas de un torrente donde se generan, transportan y depositan los flujos torrenciales. (Tomado de: “Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas”. Silva, G.)

2.6.6.1. Tramo inicial de formación de los lodos

El caudal que es producido por el evento que genera el alud torrencial fluye sobre el terreno; en su recorrido captura material suelto y comienza a formar los lodos. En estas condiciones el caudal total y la viscosidad se incrementan a medida que el flujo se acumula y se dirige hacia las corrientes principales de drenaje.

Las corrientes principales de drenaje se definen a partir de una sección de entrada cuya localización depende de las condiciones topográficas de la zona.

2.6.6.2. Tramo de transporte de lodos y de incremento del volumen de sólidos

Generalmente el primer tramo del canal es encañonado, de fuerte pendiente, y tiene gran capacidad de transporte.

A medida que el flujo se va desplazando ocurren ganancias de caudales sólido y líquido en aquellos tramos donde existe socavación del lecho y deslizamientos de los taludes.

2.6.6.3. Tramo de transporte y depósito de material sólido

A continuación del tramo de alta pendiente se presenta un tramo de transición en el cual la pendiente va cambiando de alta a media y luego a baja. En este tramo se combinan los procesos de transporte del flujo de lodos y de depósito inicial de material sólido.

2.6.6.4. Tramo final, de depósito de sólidos

El tramo de entrega corresponde al tramo final de la corriente, donde la pendiente del cauce es pequeña, y desemboca en una planicie inundable que se prolonga hasta la salida a un río o al mar. En la planicie inundable se deposita una parte de los lodos formando capas.

2.6.7. Reología de los flujos hiperconcentrados

Dentro de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, el comportamiento reológico involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Las partículas sólidas pueden chocar, rozar, rotar y vibrar en el desarrollo del movimiento, así lo expresa Brea y Spalletti (2003)²⁷.

La reología de la matriz del fluido depende de dos condiciones:

2.6.7.1. Cantidad pequeña de volumen descargado:

- Flujo donde el contenido de grava es grande y colisiona entre ellas (flujo dilatante produciendo un esfuerzo cortante)

²⁷ Brea, J. y Spalletti, P. (2003). Flujos Densos e Hidráulica de Ríos. Primer simposio regional sobre Hidráulica de ríos.

- Flujo donde el contenido de grava es pequeño; es decir, flujo de lodo (flujo Bingham).

2.6.7.2. *Cantidad grande de volumen descargado:*

- Flujo turbulento

Si la descarga del flujo en fase sólido-liquido es pequeña, el flujo es usualmente tratado como flujo laminar, y si la descarga del flujo en fase sólido-liquido es grande, el flujo es usualmente tratado como flujo turbulento.

En el marco de este trabajo especial de grado se considerará el modelo reológico de Bingham debido a que los flujos estudiados son flujos de lodos. Los fluidos Bingham presentan una relación lineal entre esfuerzos y tasa de deformación para esfuerzos de corte mayores que los esfuerzos de cadencia (Aguirre, Moncada, Guatarasma y Suárez, 2004)²⁸.

Los factores que gobiernan a estos fluidos son:

1. *Generación de esfuerzos cortantes (componente cohesivo)*

- Absorción de fuerzas entre las partículas.
- Absorción y adherencia de las moléculas de agua debido a la carga eléctrica de la superficie de las partículas.

2. *Coefficiente de viscosidad aparente*

- Disminución en espacio de corte debido a la presencia de partículas.

²⁸ Aguirre, J. y colaboradores. (2004). Análisis de Propiedades de Lodos. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Paulo.

- Disminución en espacio de corte debido a la floculación de partículas finas, incremento en la energía de enlace entre las moléculas de agua debido a la carga eléctrica de la superficie de las partículas finas.

La ecuación que describe los fluidos de Bingham está dada por:

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{du}{dy} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, τ_y es el esfuerzo de cadencia, μ es la viscosidad dinámica y du/dy el gradiente de velocidades normal a la dirección del flujo.

Liu (s.f.)²⁹ manifiesta que el esfuerzo cedente varía en el espacio y tiempo en el caso de los flujos Bingham. Según Gratton (2002)³⁰ pueden haber regiones en el fluido donde el esfuerzo cedente es excedido, y otras regiones en el cual no; esto es debido a que en estos fluidos hay moléculas de gran tamaño, de forma plana, como el caso de las arcillas, que en reposo suelen estar orientadas al azar (esto determina la viscosidad al comienzo del escurrimiento) pero a medida que el fluido se mueve, si estas partículas se orientan, el fluido escurre más fácilmente, lo que se traduce en una disminución de la viscosidad con el transcurrir del tiempo (tixotropía).

2.7. Estructuras reductoras de energía

Son estructuras diseñadas para soportar fuerzas de impacto, pueden ser compuestas por pequeños elementos del bosque, acero o concreto. Estas estructuras se localizan en fosas de

²⁹ Liu, J. (s.f). Stability of Viscoplastic Flow. Disponible en: <http://gfd.who.edu/Proceedings/2003/PDF/junjun.pdf>. [Consulta: 2006, Agosto 16]

³⁰ Gratton, J. (2002). Introducción a la Mecánica de Fluidos. Disponible en: http://chaos.usc.es/FMMETEO/CLASES/Web_Fluidos/fluidos.pdf [Consulta: 2006, Julio 03].

sedimentación o aguas arriba de una presa de control abierta para reducir el poder destructivo de los aludes torrenciales y para localizar fenómenos de disipación y erosión (Armanini, Della Putta y colaboradores, s.f.)³¹.

Estas estructuras se localizan aguas arriba de presas de control, en los casos en el que la presa este fundada sobre roca fracturada o por suelo, poco resistente a la erosión, donde se requiere obras especiales ya que el lecho no puede soportar el impacto sin erosionarse.

Unas de las estructuras parecidas son las presas de rastrillo, las cuales están formadas por una serie de elementos verticales, bien sean tubos, perfiles estructurales de acero, o columnas de concreto, empotrados en la zapata de fundación de concreto, y desligados de la parte superior (Suárez,1993)³². (Ver Figura 9).

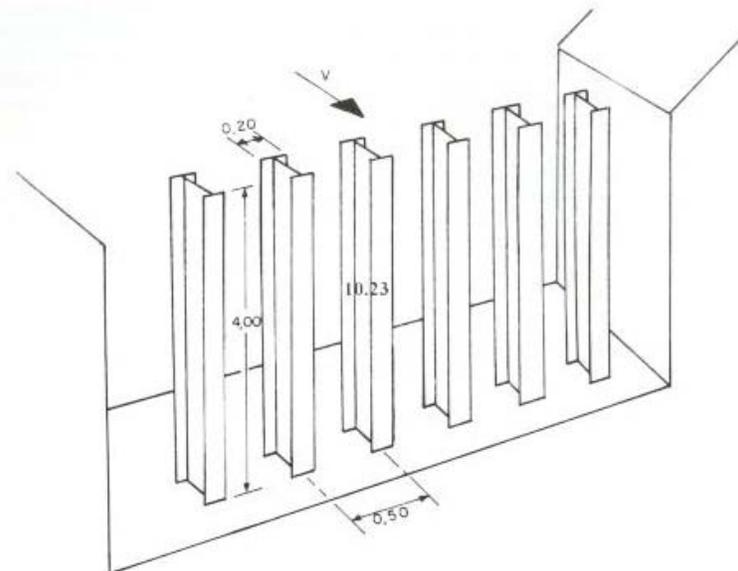


Figura 9. Presa de rastrillo con perfiles de acero. (Tomado de: “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”. Suárez, L., Pág. 10-17).

³¹ Armanini, A., Della Putta, C. y colaboradores. (s.f.). Design Criteria of Mudflow Breakers. CUDAM- Dept. of Civil and Environmental Engineering, Trento University, Italy.

³² Suárez, L. (1993) Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR.

2.8. Erosionabilidad

J. Suárez (2001)³³ lo define como la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por fenómenos erosivos. También manifiesta que los fenómenos son diferentes para suelos granulares y para suelos cohesivos, como se muestra a continuación:

2.8.1. Erosionabilidad en suelos no cohesivos

Desde el punto de vista de erosión los suelos no cohesivos son aquellos que poseen menos del 10% de partículas de arcilla. Los suelos no cohesivos tienen una estructura granular y forman una masa coherente. En los suelos no cohesivos el comportamiento a la erosión depende principalmente, del tamaño y forma de las partículas.

Las partículas finas son erosionadas por el flujo y las gruesas permanecen dependiendo de la fuerza tractiva de la corriente. Al aumentar la fuerza tractiva, las partículas de menor tamaño van siendo erosionadas y puede llegar un momento en que va desapareciendo la coraza protectora o pavimento de partículas.

2.8.2. Erosionabilidad en suelos cohesivos

Al aumentar el porcentaje de arcilla por encima del 10%, los suelos cambian drásticamente de propiedades y la arcilla asume el control del suelo. En los suelos cohesivos las interacciones electroquímicas dominan y el tamaño y peso de partículas individuales puede tener poca importancia. Los sedimentos producto de la erosión de suelos cohesivos son

³³ Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander.

transportados principalmente en suspensión y afectan en forma significativa la calidad del agua.

2.9. Similitud de flujos con superficie libre

Para la realización de un modelo físico debe existir según Bolinaga (2002)³⁴ similitud geométrica, cinemática y dinámicamente entre el modelo y el prototipo.

La similitud geométrica se cumple si ambos campos (prototipo y modelo) tienen las mismas proporciones relativas de sus contornos. Lo anterior se puede expresar así:

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda_l \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde l_m son longitudes medidas en el modelo y l_p las correspondientes medidas en el prototipo; λ_l es una constante denominada escala del modelo.

La similitud cinemática existe cuando las relaciones de velocidades para puntos correspondientes en el modelo y prototipo sean constantes, es decir:

$$\frac{V_p}{V_m} = \lambda_v \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde λ_v es una constante. Lógicamente, la equivalencia no debe ser solo en las magnitudes proporcionales de las velocidades, sino que el vector debe conservar en el

³⁴ Bolinaga, J. (2002). Mecánica Elemental de los Fluidos. Caracas: Publicación de la Universidad Católica Andrés Bello.

modelo las direcciones y sentidos del prototipo. Cuando el flujo no está confinado, la similitud cinemática requiere la existencia de similitud dinámica.

Debido a que el comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de la inercia en relación con la viscosidad (representado mediante el número de Reynolds; $R = \frac{VL}{\nu}$) y con la gravedad (representado por el número de Froude;

$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$), debe existir similitud del número de Froude y Reynolds entre el prototipo y el

modelo. Para satisfacer simultáneamente la similitud de Froude y Reynolds, la ecuación 4 se debe cumplir (Armanini, Della Putta y colaboradores, s.f.)³⁵.

$$\frac{\lambda_\rho \lambda_l \lambda_d}{\lambda_\mu} = 1 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde λ_ρ representa la escala de reducción de la densidad de la mezcla, λ_d representa la escala de reducción del diámetro de las partículas y λ_μ representa la escala de reducción de la viscosidad de la mezcla.

³⁵ Armanini, A., Della Putta, C. y colaboradores. (s.f.). Design Criteria of Mudflow Breakers. CUDAM- Dept. of Civil and Environmental Engineering, Trento University, Italy.

CAPÍTULO 3

MÉTODO

MÉTODO

En toda investigación científica se hace necesario, que los hechos estudiados, así como los resultados obtenidos y las evidencias encontradas en relación al problema investigado, reúnan las condiciones de fiabilidad, objetividad y validez. Por lo tanto el marco metodológico de la presente investigación describe en detalle el conjunto de métodos, técnicas y protocolos instrumentales que se emplearon en el proceso de recolección de los datos requeridos en la investigación propuesta y las operaciones lógicas para dar respuestas a las interrogantes expuestas en el planteamiento del problema.

La investigación en estudio es de tipo experimental, la cual consta de dos etapas. En la primera etapa, se realizó la búsqueda documental empleando una diversidad de técnicas e instrumentos de recolección de la información, que se consultaron a través de todo el proceso de investigación, así como; en la organización del trabajo escrito que se producirá al final del mismo y en la segunda etapa se realizó la parte experimental.

Para el análisis profundo de las fuentes documentales, se utilizaron las técnicas de observación documental, presentación resumida, resumen analítico y análisis crítico. A partir de la observación documental, como punto de partida en el análisis de las fuentes documentales, mediante una lectura general del texto; se inicio la búsqueda y observación de información de interés para está investigación. Seguidamente, se realizaron lecturas más detenidas con el fin de captar los planteamientos esenciales y extraer los datos bibliográficos útiles para el estudio que se realizó. La aplicación de la técnica de presentación resumida de un texto, permitió dar cuenta en forma resumida de las ideas básicas que contienen las obras consultadas. Cabe destacar la importancia de la presentación resumida en la construcción de los contenidos teóricos de la investigación, así como en lo relacionado a los resultados de otras investigaciones que se han realizado en relación al tema y los antecedentes del mismo. La técnica de resumen analítico, se incorporó para delimitar sus contenidos básicos en función de los datos que se precisan

conocer y la técnica de análisis crítico, se realizó para mostrar el desarrollo lógico y la solidez de las ideas seguidas por el autor del mismo.

Algunas técnicas operacionales para el manejo de fuentes documentales que se emplearon, a fin de introducir los procedimientos de la investigación documental en el manejo de datos requeridos en la presente investigación, fueron: subrayado, bibliográficas, de citas y notas de referencias bibliográficas, construcción y presentación de índices, presentación de gráficos e ilustraciones.

La parte experimental es donde se definen los equipos y materiales utilizados, la forma de recolectar los datos y el procesamiento de los mismos, y la secuencia de las actividades necesarias para alcanzar los objetivos planteados. En tal sentido, el desarrollo experimental de la investigación se realizó mediante las siguientes actividades:

3.1. Elaboración de lodos

La preparación de los lodos se realizó con una doble finalidad, para verificar las propiedades físicas de los lodos y para la realización de los ensayos.

Se realizaron muestras de lodos artificiales, compuestas de agua, arcilla y arena, esta última en cantidades que constituyen un 20% de la parte sólida, para satisfacer los resultados de investigaciones acerca de la influencia de la arena en flujos de barro³⁶. Para su realización se emplearon los siguientes equipos y materiales:

- Balanza de densidad (ver Figura 10), que mide densidades superiores a 1 g./cm³ y tiene una apreciación de 0,01 g./cm³.
- Balanza, la cual tiene una apreciación de 0,01 g.

³⁶ Aguirre, J. y colaboradores. (2004). Análisis de propiedades de los lodos. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Paulo.

- Recipientes con tapa de 150 litros.
- Tobo calibrado en litros.
- Pala
- Kaolinita comercial roja y blanca (cuyas propiedades se muestran en el Anexo 1)
- Arena (cuya granulometría se muestra en el Anexo 2)
- Agua de chorro.

Para garantizar la repetibilidad de los experimentos, fueron empleados procedimientos que permitieron la preparación de muestras de fluidos cuyas propiedades físicas sean semejantes para cada ocasión, con base en el protocolo para la preparación de muestras de barro propuesto por Blanco (2003)³⁷. Se establecieron entonces, la serie de pasos que se presenta a continuación:

1. Pesar en la balanza de precisión la cantidad de muestra sólida, tanto de kaolinita como de arena a diluir en la fase líquida.
2. Mezclar la muestra sólida (kaolinita y arena) con el líquido, siendo esta agua de chorro previamente medida en el tobo calibrado. La mezcla se realizó en el recipiente con tapa de 150 litros.
3. Dejar reposar la muestra durante 10 minutos, para permitir la absorción del agua por parte de los sólidos y para que ocurran las reacciones químicas.
4. Agitar periódicamente (ciclos de 15 a 20 oscilaciones cada 15 segundos) con pala y mano, durante 10 minutos.
5. Repetir la fase 3 y 4 hasta obtener una apariencia homogénea.

³⁷ Blanco, A. (2003). Protocolo para la preparación de muestras de barro. Versión 1.0

6. Tomar inmediatamente una sub-muestra del fluido en una balanza de densidad para determinar la densidad de la misma, con la finalidad de asegurar la repetibilidad en la preparación de la muestra.

Para el caso de las muestras de lodo empleadas en la verificación de las propiedades físicas de estos, se seleccionaron tres tipos de mezclas, con el fin de determinar el tiempo promedio de estabilización de concentraciones bajas, medias y altas; para ello se eligieron concentraciones de 25%, 50% y 75%, cuyas proporciones son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Proporciones de cada uno de los materiales en cada una de las concentraciones.

Concentración, Cw (%)	Kaolinita (Kg.)	Arena (Kg.)	Agua (litros)
25	20	5	75
50	40	10	50
75	60	15	25

En el caso de las muestras usadas para la realización de los experimentos, se partió de una matriz de 75% de concentración en peso, a la cual se le adicionó agua para obtener lodos de densidades menores, llevando la matriz a lodos de densidades $1,25 \text{ g./cm}^3$ y $1,42 \text{ g./cm}^3$. Es necesario destacar que para diluir la matriz es preciso que esta haya cumplido el tiempo de estabilización requerido.

3.2. Verificación de las propiedades reológicas de los lodos

Con la finalidad de estimar el tiempo necesario para producir las reacciones químicas originadas por la mezcla de agua y arcilla y obtener una buena hidratación de los lodos, además de la tixotropía que presentan estos flujos, fue necesaria la verificación de las propiedades reológicas de los lodos. Para la verificación de dichas propiedades se

realizaron mediciones de viscosidad cinemática y densidad, las cuales se realizaron por un periodo de nueve semanas, donde los lodos debieron permanecer en estado de reposo.

Para la realización de las mediciones de viscosidad cinemática y densidad de los lodos, se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza de densidad (ver Figura 10), que mide densidades superiores a 1 g./cm^3 y tiene una apreciación de $0,01 \text{ g./cm}^3$.
- Viscosímetro rotacional digital marca Visco Star Plus (ver Figura 10), cuyas especificaciones se muestran en el Anexo 6.
- Pala
- Beaker de 600 ml., cuya apreciación es de 50 ml.



Figura 10. Balanza de densidad (izquierda) y viscosímetro rotacional digital (derecha).

Las muestras analizadas fueron las mezclas de lodos de concentraciones de 25%, 50% y 75%. Se seleccionaron estos tres tipos de mezcla con el fin de determinar el tiempo promedio de estabilización de concentraciones bajas, medias y altas; para que en futuras preparaciones se respete el tiempo de estabilización de cada concentración.

Para obtener las mediciones de viscosidad cinemática y densidad, se procedió a batir cada una de las concentraciones de lodo hasta lograr una consistencia homogénea, luego para cada una de las concentraciones se realizó una toma de muestra para medir la densidad del flujo mediante el uso de la balanza de densidad. Una vez obtenido este dato se revolvió la mezcla de lodo para la realización de la medición de la viscosidad cinemática, mediante el uso del viscosímetro digital, en el cual se introdujo como dato la densidad y las revoluciones por minuto (rpm), en un rango de 30 a 200 rpm.

Se realizó una tabla (ver Anexo 4) donde se almacenaron los siguientes datos: fecha, concentración y densidad del lodo, husillo empleado en el viscosímetro, revoluciones por minutos utilizadas para obtener las medidas de viscosidad cinemática y por ultimo la viscosidad cinemática obtenida; el formato de tabla permite la recolección de datos de forma secuencial, lo cual facilita observar los cambios que presenta el fluido en cuanto a viscosidad cinemática y densidad.

Los resultados se presentan en gráficos, donde se compara el comportamiento de, viscosidad dinámica vs. tasa de deformación, para cada concentración de lodo durante las nueve semanas de mediciones.

3.3. Diseño y construcción de la plataforma experimental

La plataforma experimental fue elaborada para representar la parte baja de la cuenca, dicha plataforma consta de un tanque, un canal de pendiente variable y una plataforma fija. El canal de pendiente variable representa la garganta de un torrente y la plataforma fija representa el cono de deyección.

Para el diseño del aparato experimental no se tomó ningún prototipo; el dimensionamiento de la plataforma se basó principalmente en la disponibilidad de espacio físico.

El aparato experimental consta de un tanque de 0,3 x 0,3 x 0,8 m. (se consideró una altura del tanque de 0,8 m., debido a que la altura de flujo necesaria para producir un caudal y una energía similar a la de un alud torrencial es de 0,6 m.; cuyo cálculo se encuentran en el Anexo 7), de un canal rectangular de pendiente variable de 0,3 m. de ancho y 2 m. de largo (para garantizar las condiciones de flujo uniforme antes de entrar a la plataforma fija), y una plataforma fija de 1,4 m. de ancho y 2 m. de largo. (Ver Figura 11). El tanque consta con un sistema de compuerta y la desembocadura del canal a la plataforma fija tiene forma de cono.

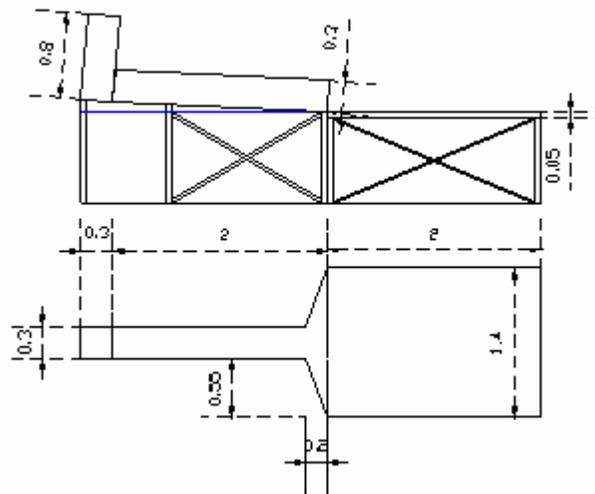


Figura 11. Modelo del aparato experimental (medidas en m.).

La construcción del tanque y del canal se realizó con plexiglás y la plataforma se realizó con madera. La construcción del aparato experimental se realizó conjuntamente con la verificación de las propiedades reológicas de los lodos. El aparato experimental es apoyado sobre una base de tubos estructurales, teniendo por debajo del tanque dos gatos manuales, que permiten inclinar el canal.

3.4. Diseño de los reductores de energía

Se diseñaron cinco modelos de reductores diferentes, los cuales a partir de tacos de madera de 4 x 8,5 cm. se le realizaron los diferentes cortes que se muestran en la Figura 12. La construcción se realizó conjuntamente con la construcción de la plataforma experimental.

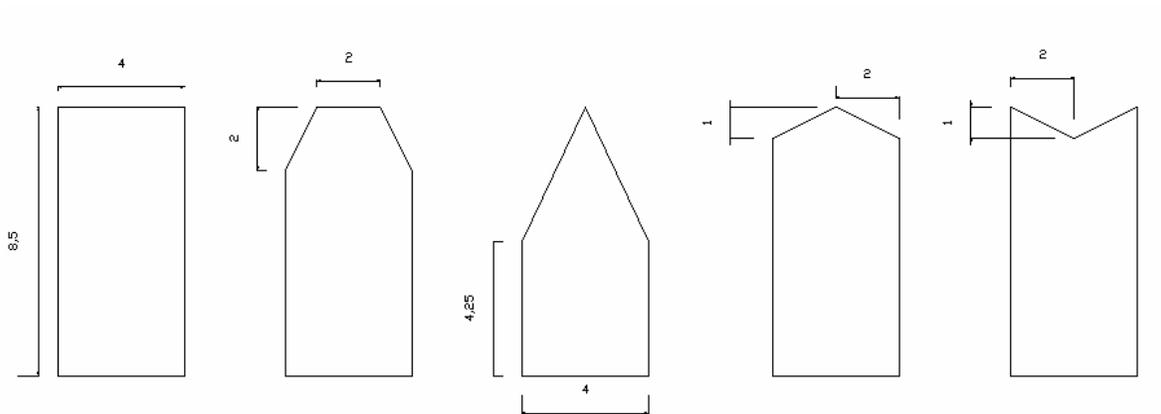


Figura 12. Modelos de reductores de energía (medidas en cm.). De izquierda a derecha: M-1, M-2, M-3, M-4, M-5.

3.5. Modelaje físico del comportamiento de los reductores de energía ante aludes torrenciales

Para la realización de los ensayos se usaron dos tipos de lodos, uno con densidad de 1,25 g./cm³ y el otro de 1,42 g./cm³.

Se utilizó una pendiente del canal de 5°, por ser la pendiente promedio de la garganta de un torrente y la plataforma fija fue inclinada un poco para facilitar el escurrimiento del lodo.

Para la ubicación de los reductores fue necesario realizar pruebas preliminares que permitieron determinar la cantidad de reductores usados y la distancia a partir de la entrada de plataforma fija a la que fueron ubicados. Estas pruebas consistieron en lanzar una

avenida de barro sobre el lecho erosionable de 3 cm. sin reductores, para medir el ancho de la mancha del lodo y la longitud de la zona erosionada. Estas pruebas arrojaron como resultado que la ubicación de los reductores de energía está condicionada por la longitud del área erosionada por el lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$, es por eso que para la primera fila de reductores se colocan máximo cinco reductores dejando 10 cm. entre los reductores, y se ubicaron a 37 cm. de la entrada del lecho, donde el ancho de la mancha de lodo era de 64 cm.

Para garantizar la repetibilidad de los ensayos, se realizaron dos ensayos para cada concentración de lodos, para cada modelo de reductor y para cada configuración sobre la plataforma, cuyas configuraciones se muestran en la Figura 13.

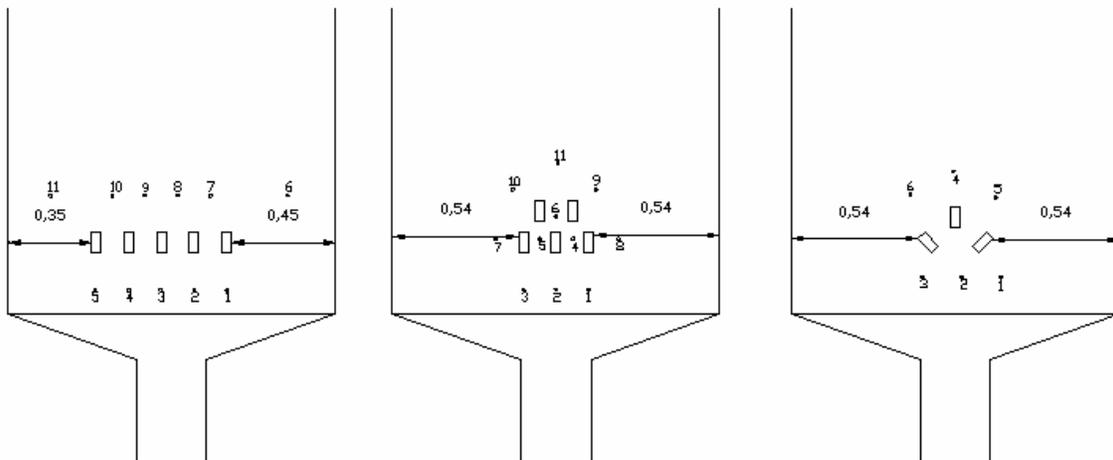


Figura 13. Disposiciones sobre la Plataforma Fija (medidas en m.). De izquierda a derecha, disposición en una fila, disposición en dos filas, disposición triangular.

También se ubicaron sobre la plataforma unos controles con medidas hasta 3 cm. (con una apreciación de 1 mm.), ubicados de acuerdo a la configuración de los reductores de energía (ver Figura 13), para medir la variación del lecho después del evento.

Se usaron tres cámaras para registrar las experiencias, una ubicada frontal a los reductores marca SONY modelo DSC-S600 de 6.0 mega pixels, otra ubicada lateral a los reductores marca SONY modelo DSC-F828 de 8.0 mega pixels y la tercera ubicada en la parte posterior a los reductores marca SONY modelo DCR-PC330 de 3.0 mega pixels.

Para la realización de los ensayos, se estableció el siguiente procedimiento:

1. Verificar la inclinación del canal.
2. Situar la compuerta en las ranuras del tanque e impermeabilizar las uniones.
3. Colocar los reductores de energía sobre la plataforma, según sea la disposición a ensayar.
4. Colocar arena (de la misma granulometría usada en la preparación de los lodos) limpia y escurrida enrasada a 3 cm. sobre la plataforma fija.
5. Colocar un recipiente al final de la plataforma, con el fin de recolectar el lodo.
6. Ubicar y enfocar las cámaras de video en sus posiciones respectivas.
7. Mezclar el lodo a utilizar hasta que alcance una consistencia homogénea.
8. Medir la densidad de los lodos, para garantizar la repetibilidad de los ensayos.
9. Vaciar la mezcla de lodo a utilizar en el tanque hasta una altura de 60 cm.
10. Activar la grabación de las cámaras.
11. Liberar rápidamente la mezcla de lodo abriendo la compuerta de forma manual.
12. Esperar que escurra la mayor parte del lodo para tomar fotos a la zona anterior y posterior a los reductores y a la vista general del lecho.
13. Retirar cuidadosamente la capa de lodo sobre el lecho para visualizar su estado y tomar las medidas de las variaciones del lecho.
14. Recuperar el lodo del recipiente colector.
15. Tomar fotos a la zona anterior y posterior a los reductores y a la vista general del lecho.
16. Retirar la arena de la plataforma y limpiar el aparato experimental.

La recopilación de datos se hizo mediante fotos digitales, videos, mediciones e inspección visual. Para llevar un control de las pruebas se recopiló la información en una planilla (ver Anexo 3) la cual cuenta con una serie de datos como: fecha, número de experiencia, densidad del flujo, disposición, modelo de reductor, cuenta con un esquema de la plataforma donde se puede representar de forma gráfica lo ocurrido después del evento, se presenta una tabla donde se plasma las variaciones de los controles y por último las observaciones.

Para evaluar el impacto del flujo contra las estructuras reductoras de energía, se tomaron imágenes del video al momento de que el flujo choca con los reductores desde dos vistas, frontal y lateral. Y para evaluar el grado de erosión que se produce aguas abajo como aguas arriba de los reductores, se tomaron fotos en la zona anterior y posterior, se realizaron observaciones y se tomaron medidas de las variaciones de lecho, mediante el uso de los controles.

Los resultados se presentan mediante una serie de imágenes, organizadas de forma tal que permitan comparar:

- El grado de erosión del lecho sin reductores de energía cuando se emplean lodos de diferentes densidades.
- El comportamiento que presentan los reductores cuando el flujo de lodo impacta contra ellos en las diferentes disposiciones, considerando la densidad del lodo.
- El grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores después de una avenida de lodo además de la forma de la erosión, para los diferentes reductores de energía en cada disposición de los reductores, considerando la densidad del lodo.

Para comparar el grado de erosión del lecho después de una avenida de lodo también se presentan tablas para cada configuración espacial de los reductores, donde se comparan las

variaciones de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores, considerando la densidad del lodo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1.Resultados

La experimentación con cinco modelos de reductores ubicados en tres configuraciones distintas sobre un fondo erosionable y dos tipos de lodo permitió obtener resultados muy interesantes, los cuales se presentaran en graficas, tablas e imágenes. En las graficas se muestra el comportamiento de la viscosidad con respecto a la tasa de deformación del flujo de lodo al transcurrir de las semanas y a través de imágenes se representa el fenómeno de disipación al momento de impactar el flujo de lodo contra los reductores de energía, el estado del lecho erosionable cuando éste se encuentra sin reductores de energía y cuando los posee, también se emplearon tablas para comparar el estado del lecho erosionable cuando posee los diferentes reductores de energía.

4.1.1. Comportamiento de la viscosidad con respecto a la tasa de deformación

El comportamiento de la viscosidad con respecto a la tasa de deformación de las diferentes concentraciones de lodo al transcurrir de las semanas se presenta en los siguientes gráficos:

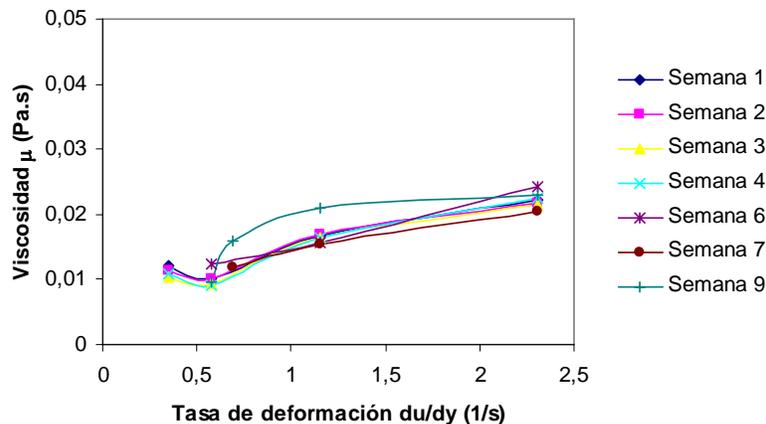


Gráfico 1. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 25% de concentración, al transcurrir de las semanas.

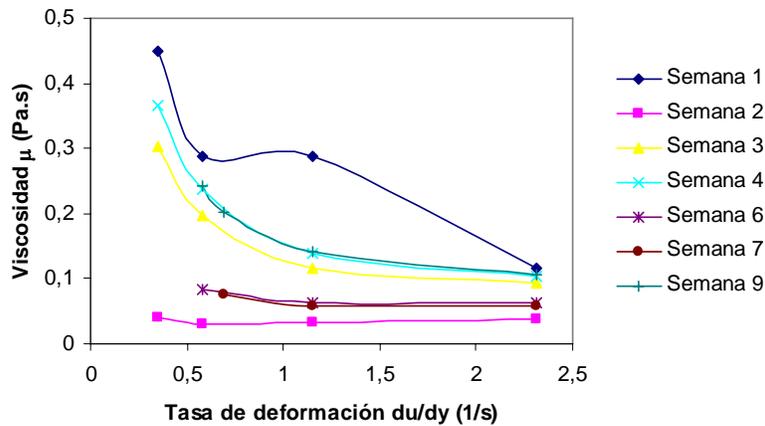


Gráfico 2. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 50% de concentración, al transcurrir de las semanas.

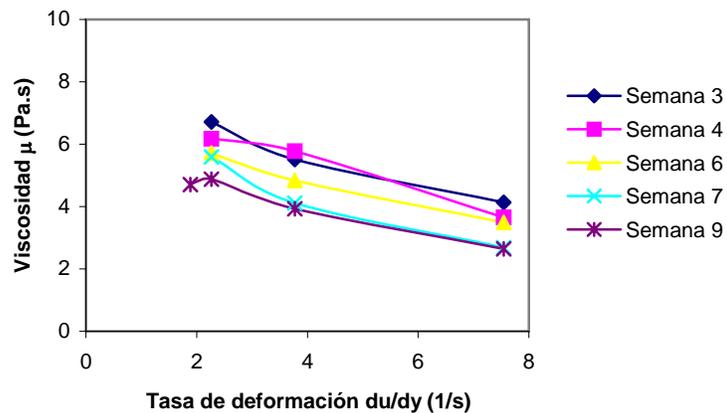


Gráfico 3. Comparación del comportamiento de la viscosidad vs. tasa de deformación del lodo de 75% de concentración, al transcurrir de las semanas.

4.1.2. Estado del lecho erosionable cuando éste se encuentra sin reductores

El estado del lecho erosionable cuando éste se encuentra sin reductores de energía, se presenta en las siguientes imágenes, donde se observa el grado de erosión del lecho luego de una avenida de lodo; tomando en consideración la densidad del mismo.

Comparación del grado de erosión del lecho sin reductores de energía cuando se emplean lodos de diferentes densidades.



A 37 cm. de la entrada del lecho, se obtuvo un ancho de mancha de lodo para ambas densidades de 64 cm.

4.1.3. Fenómeno de disipación de energía

El fenómeno de disipación de energía, se observa en las siguientes imágenes, donde se visualiza el impacto del flujo de barro (de cada una de las densidades) contra los diferentes reductores de energía; considerando la disposición de los reductores.

4.1.3.1. Para el lodo de densidad $1,25 \text{ g./cm}^3$

Comparación del comportamiento de los diferentes reductores, cuando el lodo impacta contra ellos en las diferentes disposiciones.



REDUCTOR M-2

Disposición en una fila



Figura 19. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 20. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 21. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en forma triangular.

REDUCTOR M-3

Disposición en una fila



Figura 22. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 23. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 24. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en forma triangular.

REDUCTOR M-4

Disposición en una fila



Figura 25. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 26. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 27. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en forma triangular.

REDUCTOR M-5

Disposición en una fila



Figura 28. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 29. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 30. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-5 ubicados en forma triangular.

4.1.3.2. Para el lodo de densidad $1,42 \text{ g./cm}^3$

Comparación del comportamiento de los diferentes reductores, cuando el lodo impacta contra ellos en las diferentes disposiciones.



REDUCTOR M-2

Disposición en una fila



Figura 34. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 35. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 36. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-2 ubicados en forma triangular.

REDUCTOR M-3

Disposición en una fila



Figura 37. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 38. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 39. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-3 ubicados en forma triangular.

REDUCTOR M-4

Disposición en una fila



Figura 40. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en una fila.

Disposición en dos filas



Figura 41. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en dos filas.

Disposición triangular



Figura 42. Impacto del flujo de barro ($\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$) contra los reductores M-4 ubicados en forma triangular.



4.1.4. Estado del lecho erosionable cuando en éste se encuentran los reductores

El estado del lecho erosionable cuando en éste se encuentran ubicados los reductores de energía en las diferentes configuraciones, se presenta en una tabla para cada disposición, donde se muestran las variaciones del lecho medidas por los controles ubicados a lo largo

del lecho, tanto en la zona anterior a los reductores como la posterior y también se presentan imágenes donde se visualiza el grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, además la forma de la erosión para los diferentes reductores de energía en cada disposición de los reductores; tomando en consideración la densidad del lodo.

4.1.4.1. Para el lodo de densidad 1,25 g/cm³

Tabla 3. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en una fila, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g/cm}^3$.

		DISPOSICIÓN EN UNA FILA									
		Variaciones (cm.)									
	Modelo de reductor	M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
	Número de ensayo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	2,4	2,4	2,8	2,2	2,0	1,8	2,5	2,1	1,5	1,5
	2	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	3	2,6	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,8	3,0
	4	2,5	2,5	2,8	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,7
	5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	1,5	1,5	1,6	1,6	2,1	2,2	1,7	1,9	1,5	1,9
	8	2,5	2,0	2,7	2,8	2,7	2,6	2,3	2,5	2,4	2,7
	9	2,3	2,3	2,6	2,5	2,5	2,3	2,5	2,8	2,4	2,5
	10	0,4	0,3	0,7	0,3	0	0,2	0,3	0,5	0,5	0,9
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en una fila, después de la avenida de lodo.

DISPOSICIÓN EN UNA FILA		
Reductor M-1		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a las reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 46. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 47. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 48. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en una fila.</p>
Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a las reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 49. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 50. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 51. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</p>

Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a las reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 52. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 53. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 54. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</p>
Reductor M-4		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a las reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 55. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 56. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 57. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en una fila.</p>
Reductor M-5		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a las reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 58. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 59. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 60. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en una fila.</p>

Tabla 4. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.

		DISPOSICIÓN EN DOS FILAS									
		Variaciones (cm.)									
Modelo de reductor	Número de ensayo	M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	2,8	2,9	3,0	2,8	3,0	3,0	2,8	2,6	2,5	2,8
	2	3,0	3,0	2,6	2,8	3,0	3,0	2,5	2,7	2,3	2,5
	3	2,6	2,8	2,6	2,8	3,0	3,0	2,3	2,5	2,5	2,5
	4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0	2,3	3,0
	5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,7	3,0	2,3	3,0
	6	2,6	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,3	3,0	1,7	3,0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0,3	0,1	0	0
	9	2,0	2,1	2,5	2,6	2,0	2,2	2,0	2,3	1,3	1,5
	10	1,5	1,4	1,5	1,2	1,0	1,0	1,8	1,5	0,8	0,7
	11	0,5	0,7	1,5	0,9	2,0	1,8	0,3	0	0,8	0,8

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo.

DISPOSICIÓN EN DOS FILAS		
Reductor M-1		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 61. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 62. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 63. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en dos filas.</p>

Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 64. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 65. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 66. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en dos filas.</p>
Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 67. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 68. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 69. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en dos filas.</p>
Reductor M-4		
Vista lateral del lecho	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 70. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</p>	 <p>Figura 71. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 72. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</p>

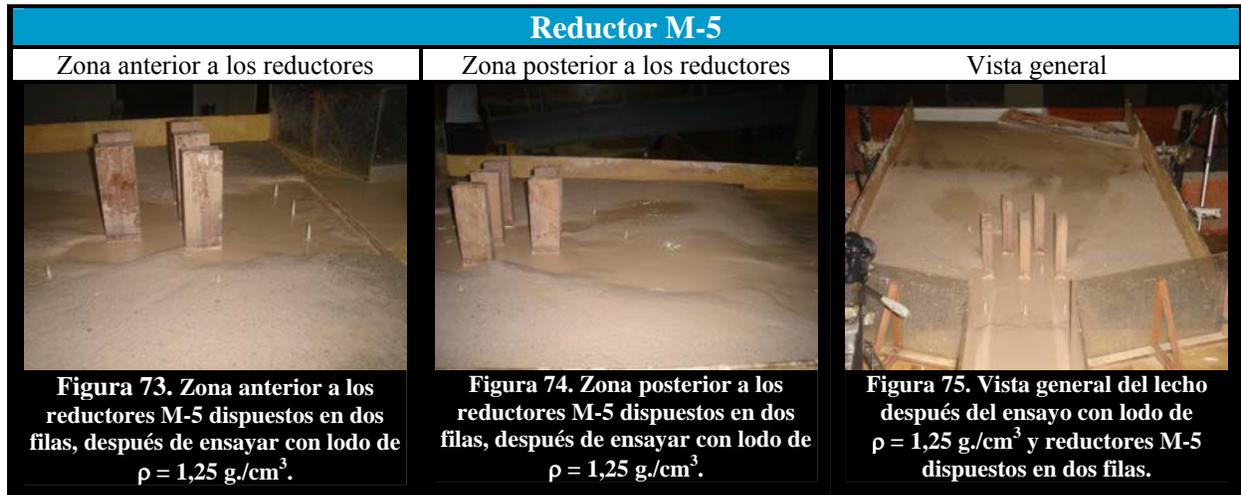


Tabla 5. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.

		DISPOSICIÓN TRIANGULAR									
		Variaciones (cm.)									
Modelo de reductor		M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
Número de ensayo		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,8	3,0	3,0
	2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0	3,0	3,0
	3	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0	3,0	3,0
	4	1,5	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	1,2
	5	0,7	0,6	2,5	2,0	3,0	2,6	1,8	1,8	1,2	1,2
	6	0,3	0,2	0,8	0,9	1,0	0,9	0,2	0	0,5	0,3

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo.

DISPOSICIÓN TRIANGULAR		
Reductor M-1		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
		
<p>Figura 76. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	<p>Figura 77. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	<p>Figura 78. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en forma triangular.</p>
Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
		
<p>Figura 79. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	<p>Figura 80. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	<p>Figura 81. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en forma triangular.</p>

Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 82. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 83. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 84. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en forma triangular.</p>
Reductor M-4		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
 <p>Figura 85. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 86. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 87. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en forma triangular.</p>
Reductor M-5		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
 <p>Figura 88. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 89. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 90. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,25 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en forma triangular.</p>

4.1.4.2. Para el lodo de densidad 1,42 g/cm³

Tabla 6. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en una fila, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.

		DISPOSICIÓN EN UNA FILA									
		Variaciones (cm.)									
Modelo de reductor	Número de ensayo	M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	0	1,3	0	0	0	0,3	1,2	1,3	0,4	1,0
	2	2,1	3,0	2,8	2,8	3,0	2,7	3,0	3,0	2,6	3,0
	3	2,2	3,0	2,7	2,7	3,0	2,6	3,0	3,0	2,6	3,0
	4	2,2	3,0	2,3	1,5	3,0	2,7	2,2	3,0	2,2	3,0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	6	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0
	7	1,4	1,3	0,2	0,4	1,2	1,2	1,7	2,0	1,5	1,3
	8	1,6	3,0	2,0	1,8	2,6	2,6	2,6	2,1	2,3	2,0
	9	1,3	2,2	1,4	1,1	2,5	2,6	2,6	2,1	1,5	2,0
	10	0,6	0,5	0	0	0	0	0,8	0,3	0	0,5
	11	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en una fila, después de la avenida de lodo.



Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Vista lateral del lecho	Vista general del lecho
 <p>Figura 94. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 95. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</p>	 <p>Figura 96. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en una fila.</p>
Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Vista lateral del lecho	Vista general del lecho
 <p>Figura 97. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 98. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</p>	 <p>Figura 99. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</p>
Reductor M-4		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 100. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 101. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en una fila, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 102. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en una fila.</p>

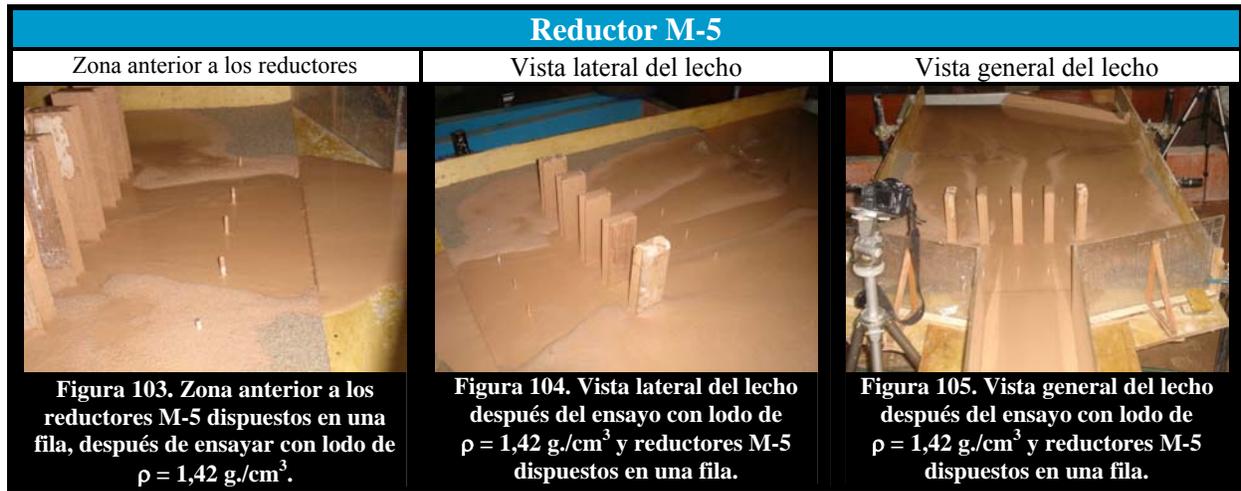


Tabla 7. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g/cm}^3$.

		DISPOSICIÓN EN DOS FILAS									
		Variaciones (cm.)									
Modelo de reductor		M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
Número de ensayo		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	1,8	1,7	1,2	1,1	0,5	1,0	1,2	1,2	0,6	0,6
	2	1,9	1,7	1,0	1,1	0,5	1,1	0,9	1,3	0,5	0,6
	3	2,0	1,8	1,2	1,1	0,6	1,1	1,1	1,3	0,5	0,6
	4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	6	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	1,6	1,5	1,1	1,0	0,7	1,0	0,5	0,7	0,4	0,3
	10	0,3	0,2	0,2	0,3	0	0,2	0	0	0	0
	11	0,8	0,8	1,2	1,2	0,5	0,3	0	0	0	0

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en dos filas, después de la avenida de lodo.

DISPOSICIÓN EN DOS FILAS		
Reductor M-1		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 106. Zona anterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 107. Zona posterior a los reductores M-1 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 108. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-1 dispuestos en dos filas.</p>
Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 109. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 110. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 111. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en dos filas.</p>

Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 112. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 113. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 114. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en dos filas.</p>
Reductor M-4		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 115. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 116. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 117. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en dos filas.</p>
Reductor M-5		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista general del lecho
 <p>Figura 118. Zona anterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 119. Zona posterior a los reductores M-5 dispuestos en dos filas, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 120. Vista general del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-5 dispuestos en dos filas.</p>

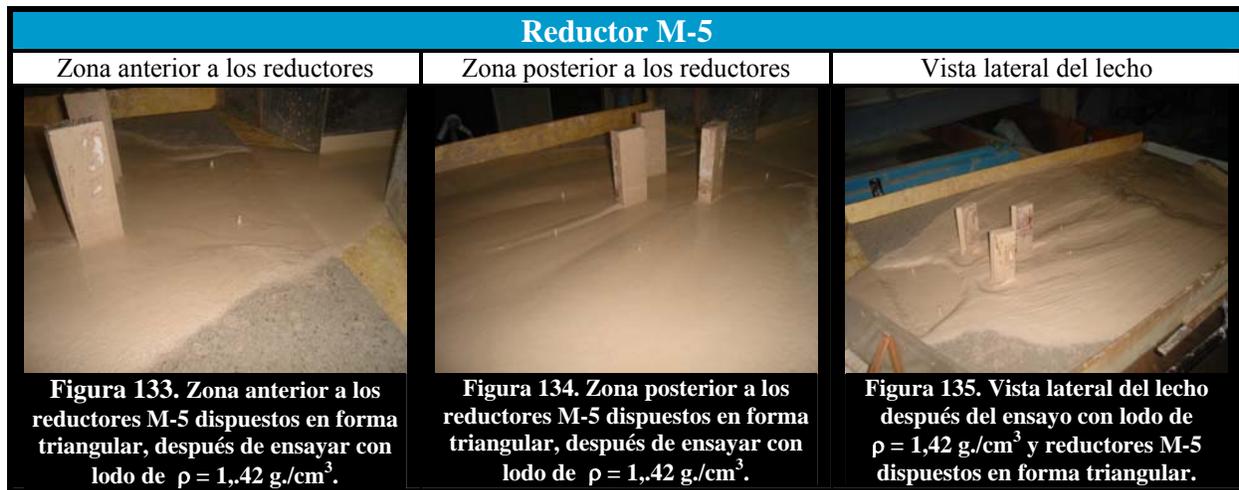
Tabla 8. Comparación de las variaciones (en cm.) de las medidas de los controles entre los diferentes modelos de reductores ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.

		DISPOSICIÓN TRIANGULAR									
		Variaciones (cm.)									
Modelo de reductor		M-1		M-2		M-3		M-4		M-5	
Número de ensayo		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Control	1	2,6	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,6	1,5
	2	2,6	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,6	1,6
	3	2,7	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,6	1,5
	4	0,5	0,3	0,4	0,5	1,0	1,2	0	0,3	0,2	0
	5	0,6	0,4	0,7	0,6	1,6	1,8	0	0,4	0	0
	6	0	0	0,3	0,2	0,3	0,6	0	0	0	0

Comparación del grado de erosión en la zona anterior y posterior a los reductores, la forma de la erosión entre los diferentes reductores de energía ubicados en forma triangular, después de la avenida de lodo.



Reductor M-2		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
 <p>Figura 124. Zona anterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 125. Zona posterior a los reductores M-2 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 126. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-2 dispuestos en forma triangular.</p>
Reductor M-3		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
 <p>Figura 127. Zona anterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 128. Zona posterior a los reductores M-3 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 129. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-3 dispuestos en forma triangular.</p>
Reductor M-4		
Zona anterior a los reductores	Zona posterior a los reductores	Vista lateral del lecho
 <p>Figura 130. Zona anterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 131. Zona posterior a los reductores M-4 dispuestos en forma triangular, después de ensayar con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$.</p>	 <p>Figura 132. Vista lateral del lecho después del ensayo con lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$ y reductores M-4 dispuestos en forma triangular.</p>



4.2. Análisis de resultados

En el Gráfico 1, donde se compara el comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de deformación del lodo de 25% de concentración, se observa que la serie de datos de la semana 9 no sigue el mismo comportamiento del resto de los datos, esto puede deberse a errores humanos en el manejo del viscosímetro. Descartando la serie de datos de la semana 9, se observa que a partir de la tercera semana la mezcla sigue el mismo comportamiento, es decir; que la mezcla de lodo de 25% de concentración tiende a estabilizar a partir de la tercera semana.

En el Gráfico 2, donde se compara el comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de deformación del lodo de 50% de concentración se observa que la serie de datos de las semanas 2, 6 y 7 se aleja del comportamiento del resto de los datos. Los errores existentes en la serie de datos de la semana 2 pueden deberse a errores humanos en el manejo del viscosímetro, en el caso de la serie de datos de las semanas 6 y 7 los errores pueden deberse a un mal mezclado del lodo, lo cual ocasionó densidades inferiores a $1,37 \text{ g./cm}^3$ (ver Anexo 5), no siendo esto lógico porque al transcurrir del tiempo los valores esperados de densidades tenderían a aumentar, producto de la evaporación del agua. Descartando la serie

de datos de las semanas 2, 6 y 7, se observa que la mezcla de lodo tiende a seguir el mismo comportamiento a partir de la semana 4, es decir; la mezcla de lodo de 50% de concentración tiende a estabilizar a partir de la cuarta semana.

En el Gráfico 3, donde se compara el comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de deformación del lodo de 75% de concentración se observa que la mezcla tiende a estabilizar a partir de la séptima semana.

En los tres Gráficos anteriormente mencionados, se observa que la viscosidad de la mezcla de lodo disminuye al aumentar la tasa de deformación.

Debido a la tixotropía que presentan los flujos de lodo y a las características propias de este flujo no se pudo realizar un modelaje físico reducido a escala, porque para realizar un modelo reducido a escala la Ecuación 4 debe ser cumplida, pero para cumplir con dicha ecuación es necesario usar un material de diámetro menor, u otro tipo de flujo con densidades y viscosidades menores a la del lodo (producto de la reducción de escala), siendo esto difícil, ya que no se puede reducir el diámetro de una partícula de arcilla y por otra parte si se usa otro fluido se perdería las características propias de un flujo de lodo.

En las Figura 14 y 15, se observa que se deposita una capa de lodo sobre la entrada del lecho, teniendo mayor grado de erosión el lecho con el lodo de densidad $1,25 \text{ g./cm}^3$.

La ubicación de los reductores de energía está condicionada por la longitud del área erosionada por el lodo de $\rho = 1,42 \text{ g./cm}^3$, es por eso que para la primera fila de reductores se ubicó a 37 cm. de la entrada del lecho, donde se obtiene un ancho de mancha de lodo de 64 cm. pudiéndose colocar un máximo de cinco reductores en la primera fila.

Después de analizar desde la Figura 16 hasta la Figura 45, se puede decir que el efecto de disipación de energía al momento de impactar con los reductores no se ve influenciado por la densidad del flujo.

En estas figuras se puede observar que al momento de impactar el flujo de lodo con los reductores M-2, M-3 y M-4 se forman dos chorros laterales, siendo el modelo M-4 capaz de generar grandes longitudes de chorros, todo lo contrario sucede con el modelo M-3 donde se observan chorros pequeños, siendo el flujo diseccionado por los reductores. También se observa que el modelo M-1 y M-5 generan grandes chorros verticales, con la diferencia que el chorro generado por el modelo M-5 es en forma de oleada, aguas arriba de los reductores. Además se puede observar que la configuración en dos filas es la más eficiente para la disipación de energía, debido a la gran turbulencia que produce el flujo al impactar con los reductores de energía.

El análisis del estado del lecho se realiza tomando en consideración la densidad del lodo, debido a que como se muestra en las Figuras 14 y 15, el grado de erosión depende de la densidad del lodo. Para cada densidad de lodo, el análisis es basado en la comparación de las diferentes disposiciones y modelos de reductores de energía.

Para el caso del lodo con densidad de 1,25 g./cm³:

Analizando las medidas de las variaciones del lecho, se observa que los controles ubicados en la zona anterior a los reductores presentan mayores variaciones que los de la zona posterior. Comparando las medidas realizadas para la disposición en una fila (Tabla 3), en dos filas (Tabla 4) y triangular (Tabla 5), la disposición en dos filas muestra variaciones menores tanto en la zona anterior como la posterior a los reductores, pero debido a que las variaciones son muy pequeñas; de milímetros, es necesario comparar la forma de la erosión dejada por el flujo en función de los diferentes modelos y disposiciones de los reductores de energía.

En el caso de la disposición en una fila, los modelos de reductores donde se evidencia el menor grado de erosión tanto aguas arriba como agua abajo de los reductores, son el M-4 y M-5 donde se observa una capa de arena en la zona anterior a los reductores (ver Figura 55 y 58), y dos líneas de erosión en la zona posterior (ver Figura 56 y 59), teniendo menos profundidad las del reductor M-5.

Para la disposición en dos filas, se visualiza que la erosión disminuye notablemente aguas abajo de los reductores y también se observa que el grado de erosión de la zona anterior a los reductores es mucho menor que en la disposición en una fila. En esta disposición los reductores que presentan mejor comportamiento, son el M-1 y M-5. En el modelo M-1, en la parte posterior a los reductores se generan dos líneas de erosión hacia los laterales del lecho (ver Figura 63), y en el modelo M-5 el lodo se esparce aguas abajo de los reductores formándose un área en forma de abanico (ver Figura 75) con muy poca variación del lecho.

Cuando los reductores son ubicados de forma triangular, la forma de erosión no varía, se forman cuatro líneas de erosión en la zona posterior a los reductores, demostrando menor grado de erosión el modelo M-2.

Para el caso del lodo con densidad de 1,42 g./cm³:

Después de analizar el contenido de las tablas 6, 7 y 8, se observa que el grado de erosión es menor que el observado para el lodo de densidad 1,25 g./cm³ siguiendo el mismo patrón de erosión, mayor en la zona anterior a los reductores y menor en la posterior. Realizando una comparación entre las diferentes configuraciones, se observa que la mejor disposición es en dos filas, de igual forma como se muestra para el lodo de densidad 1,25 g./cm³, pero además se visualiza que el reductor que presenta menos variaciones sobre el lecho es el M-5. Para verificar lo anteriormente dicho, se compara la forma de la erosión dejada por el flujo en función de los diferentes modelos y disposiciones de los reductores de energía.

Para la disposición en una fila, los reductores M-2 y M-5 presentaron menor erosión en la zona posterior a ellos, formándose dos líneas de erosión (ver Figura 95 y 104). En el caso de la disposición en dos filas se observa que la disminución de la erosión es importante, esto se evidencia con todos los modelos de reductores, principalmente en el caso del reductor M-5 donde se forman dos pequeñas líneas hacia los laterales de la zona posterior de los reductores con muy poca profundidad (ver Figura 120). En la disposición triangular, se observa que para todos los modelos se forman dos líneas de erosión en la parte central del lecho aguas abajo de los reductores, presentando menor grado de erosión el lecho con el modelo M-2.

De forma general, se puede decir que los resultados obtenidos son fidedignos, debido a que fueron controladas todas las variables para la realización de los ensayos, alcanzando así la repetibilidad en los datos obtenidos. Así lo muestra la Figura 136, donde se observa que para dos ensayos del mismo modelo de reductor en la misma disposición, la forma de la erosión sigue el mismo patrón. También se puede decir que debido a la turbulencia que genera el flujo al impactar con los reductores de energía se produce socavación en las bases de estos.



Figura 136. Repetibilidad de los ensayos con reductor M-1 dispuesto en una fila (Izquierda primer ensayo y derecha segundo ensayo).

El modelo de reductor y la disposición más eficiente es el modelo M-5 dispuesto en dos filas, por ser el que produce más turbulencia al momento de impactar el flujo contra ellos, generando chorros de gran magnitud en forma de oleada aguas arriba de los reductores. Esta turbulencia produce pérdida de energía, energía que es necesaria para el arrastre de sedimento, por esta razón la zona de erosión después de los reductores disminuye considerablemente. La configuración en dos filas reduce la erosión aguas arriba de los reductores, debido a que el flujo entrante al lecho coincide con la doble columna de chorro que desciende, ocasionando la pérdida de velocidad del flujo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El aparato experimental permitió observar el fenómeno estudiado.
- En la preparación de los lodos se debe seguir una metodología apropiada.
- Las mezclas de lodo de concentraciones bajas como el de 25%, se estabiliza en la tercera semana, en cambio las mezclas de concentración media como el de 50% alcanza su estabilidad a la cuarta semana, siendo la última en estabilizarse la mezcla de 75%, la cual lo alcanza en la séptima semana.
- La viscosidad de la mezcla de lodo disminuye al aumentar la tasa de deformación.
- El fenómeno de disipación de energía (en cuanto a cantidad, forma y longitud de los chorros) al momento de impactar con los reductores no se ve influenciado por la densidad del flujo.
- Los reductores que presentan mayor disipación de energía son: M-4 y M-5.
- El grado de erosión depende de la densidad del lodo, produciendo mayor arrastre de sedimento en los lodos de menor densidad.
- El modelo reductor M-3 y la disposición triangular resultaron ser el modelo de reductor y la disposición menos eficiente.
- El modelo de reductor y la disposición más eficiente es el modelo M-5 dispuesto en dos filas.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar las mediciones de viscosidad de forma rápida.
- Verificar la densidad de los lodos, al inicio de cada experiencia para garantizar que el flujo sea el mismo.
- Verificar antes de cada ensayo, que cada equipo se encuentre en el sitio adecuado y en funcionamiento.
- Realizar los ensayos en tiempos no mayores a 20 minutos, debido a la evaporación de la mezcla de lodo.
- Tapar los lodos cuando estos no se estén utilizando, debido a la evaporación de la mezcla.
- Verificar la nivelación del canal antes de la realización de las experiencias.
- Realizar estudios posteriores combinando la forma del reductor M-4 y M-5, siendo estos los modelos que proporcionaron mejores resultados en cuanto a disipación de energía.
- Realizar estudios de impacto sobre estas estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, J. y colaboradores. (2004). Análisis de Propiedades de Lodos. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Paulo.
- Arattano, M. y Franzini, L. (2004). Analysis of Different Water-Sediment Flow Processes in a Mountain Torrent. Natural hazards and earth system sciences.
- Armanini, A., Dalrí, C. y colaboradores. (s.f). Experimental Analysis of the General Features of Uniform Mud-flow. Trento.
- Armanini, A., Della Putta, F. y colaboradores. (s.f). Design Criteria of Mudflow Breakers. CUDAM- Dept. of Civil and Environmental Engineering, Trento University, Italy.
- Banesco Seguros, C.A. (2006). Ingeniería Forense y Estudio de Sitio/ Guía para la Prevención y Gestión de Riesgo. Caracas.
- Blanco, A. (2003). Protocolo para la preparación de muestras de barros. Versión 1.0.
- Bolinaga, J. (2002). Mecánica Elemental de los Fluidos. Caracas: Publicación de la Universidad Católica Andrés Bello. 792 p.
- Brea, J. y Spalletti, P. (2003). Flujos Densos e Hidráulica de Ríos. Primer simposio regional sobre Hidráulica de ríos.
- Escobar, G. (2003). Manual de Geología para Ingenieros. Disponible: http://www.geocities.com/manualgeo_00/ [Consulta: 2006, noviembre 06].
- Genatios, C. y Lafuente, M. (2003). Lluvias Torrenciales en Vargas, Venezuela, en diciembre de 1999, Protección Ambiental y Recuperación Urbana. Boletín Técnico IMME,41 (2-3);51.
- Gratton, J. (2002). Introducción a la Mecánica de Fluidos. Disponible en: http://chaos.usc.es/FMMETEO/CLASES/Web_Fluidos/fluidos.pdf [Consulta: 2006, Julio 03].
- Hessel, R. (2002). Modelling Soil Erosion in a Small Catchment on the Chinese Loess Plateau. Disponible en : <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2002-1119-144142/inhoud.htm> [Consulta: 2006, Julio 03].

- <http://www.geofisica.unam.mx/ineter/lahares1.php?doc=6>. [Consulta: 2006, Agosto 16].
- Instituto de Mecánica de los Fluidos (IMF) de la Universidad Central de Venezuela (UCV) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmicas (FUNVISIS). (2005). Evaluación y Diagnóstico del Comportamiento de las Canalizaciones y Presas de Control de Sedimentos en el Estado Vargas con Motivo de las Lluvias de Febrero del 2005.
- Julien, P. y León, C. (2000). Mud floods, Mudflows and Debris Flows. Classification, Rheology and Structural Design. Jornadas de investigación JIFI 2000.
- Liu, J. (s.f). Stability of Viscoplastic Flow. Disponible en: <http://gfd.who.edu/Proceedings/2003/PDF/junjun.pdf>. [Consulta: 2006, Agosto 16].
- O'Brien, J. (1986). Physical Process, Rheology and Modeling of Mudflows.
- Silva, G. (2003). Avalanchas Generadas por Lluvias, Sismos y Erupciones Volcánicas. Disponible: <http://www.geocities.com/gsilvam/lahares.htm> [Consulta: 2006, Agosto 30].
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Editorial Ingeniería de Suelos LTDA. 540 p.
- Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Bucaramanga: División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander. 548 p.
- Suárez, L. (1993). Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos. Caracas: MARNR. 490 p.
- Ven Te Chow. (2000). Hidráulica de Canales Abiertos. Colombia: Nomos S.A. 667 p.
- Wan, Z. y Wang, Z (1994). Hyperconcentrated Flow. Beijing: IAHR.

ANEXOS



VENECAOLIN C.A.
Compañía Venezolana de Caolin

INDUSTRIAL VENECAOLIN, C.A.

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CAOLIN tipo "CR-1"- (Rojo)

<u>ANÁLISIS QUÍMICO: (*)</u>	%
SiO ₂ :	60,88
CaO:	2,58
MgO:	0,16
Al ₂ O ₃ :	25,79
Fe ₂ O ₃ :	1,36

<u>ANÁLISIS FÍSICO: (**)</u>	%
HUMEDAD:	7,50
PERDIDA A LA CALCINACIÓN:	9,15

<u>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: (***)</u>	%
PASANTE sobre la MALLA 200:	100
RETENIDO sobre la MALLA 200:	

(*) Los valores aquí descritos fueron obtenidos directamente a través de proveedor en la mina, y son primordialmente referenciales.

(**) Los valores de humedad del producto terminado fluctúan según la humedad presente en la materia prima al momento del proceso y aquella presente en su entorno en almacén.

(***) Damos fe que los valores granulométricos aquí suministrados son reales y fidedignos.



V E N E C A O L I N C. A.
Compañía Venezolana de Caolin

INDUSTRIAL VENECAOLIN, C.A.

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CAOLIN tipo “CR-1”- (Blanco)

<u>ANÁLISIS QUÍMICO: (*)</u>	%
SiO ₂ :	65,08
CaO:	0,55
MgO:	0,20
Al ₂ O ₃ :	24,15
Fe ₂ O ₃ :	0,50

<u>ANÁLISIS FÍSICO: (**)</u>	%
HUMEDAD:	7,50
PERDIDA A LA CALCINACIÓN:	4,82

<u>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: (***)</u>	%
PASANTE sobre la MALLA 200:	100
RETENIDO sobre la MALLA 200:	

(*) Los valores aquí descritos fueron obtenidos directamente a través de proveedor en la mina, y son primordialmente referenciales.

(**) Los valores de humedad del producto terminado fluctúan según la humedad presente en la materia prima al momento del proceso y aquella presente en su entorno en almacén.

(***) Damos fe que los valores granulométricos aquí suministrados son reales y fidedignos.

Anexo 2. Granulometría de la arena empleada para la elaboración de lodos y para el lecho erosionable.



PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS
GRANULOMETRIA DE MUESTRAS DE SEDIMENTOS DEL LECHO

UBICACIÓN DE LA MUESTRA: IMF. Ensayo

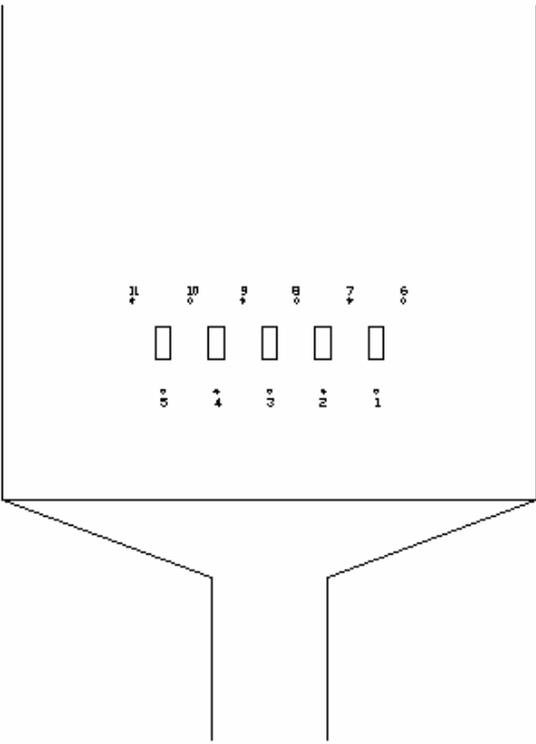
FECHA DE RECOLECCIÓN: _____

FECHA DE LABORATORIO: 27/04/05

PESO DE LA MUESTRA: **360,61**

TAMIZ	DIÁMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	PESO ACUMULADO (g)	% MAS GRUESO	% MÁS FINO
1	25	0	0	0,00	100,00
1/4	6,3	0	0	0,00	100,00
5	4	0	0	0,00	100,00
6	3,35	0	0	0,00	100,00
10	2	0	0	0,00	100,00
18	1	271,84	271,84	75,38	24,62
45	0,355	87,08	358,92	99,53	0,47
60	0,25	0,86	359,78	99,77	0,23
80	0,18	0,39	360,17	99,88	0,12
120	0,125	0,18	360,35	99,93	0,07
200	0,075	0,12	360,47	99,96	0,04
PAN		0,14	360,61	100,00	0,00

Anexo 3. Planilla de recolección de datos para la evaluación cualitativa del comportamiento de estructuras reductoras de energía ante aludes torrenciales.

		EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS REDUCTORAS DE ENERGÍA ANTE ALUDES TORRENCIALES	
Fecha: Modelo de Reductor: Disposición de los Reductores: N° de Ensayo: Densidad del flujo, ρ (gr/cm ³):			
Esquema de la Plataforma		Mediciones	
		Control	Variaciones (cm.)
		1	
		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
		7	
		8	
		9	
		10	
11			
		Observaciones	

Anexo 4. Planilla de recolección de datos para las mediciones de densidad y viscosidad cinemática.

		MEDICIONES DE VISCOSIDAD Y DENSIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LODO.				
Semana	Concentración, C_w (%)	Densidad, ρ (gr./cm ³)	Husillo	Velocidad angular, ω (RPM)	Viscosidad Cinemática, ν (mm ² /s)	

Anexo 5. Datos de las mediciones de densidad y viscosidad cinemática, de las diferentes concentraciones de lodo.

		MEDICIONES DE VISCOSIDAD Y DENSIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LODO.			
Distancia desde el fondo del beaker hasta el disco del husillo (h)= 6,8 cm. Radio del disco del husillo R6 (r) = 0,75 cm. Radio del disco del husillo R2 (r) = 2,45 cm.					
Semana	Concentración, Cw (%)	Densidad, ρ (gr./cm ³)	Husillo	Velocidad angular, ω (RPM)	Viscosidad Cinemática, ν (mm ² /s)
Semana 1 17/03/2006	25%	1,16	R6	30	10,5
				50	8,8
				100	14,4
				200	19,2
	50%	1,38	R6	30	325,2
				50	208,9
				100	124,7
				200	85
	75%	1,7		error en mediciones	
	Semana 2 23/03/2006	25%	1,16	R6	30
50					8,8
100					14,5
200					18,8
50%		1,37	R6	30	29,8
				50	21,5
				100	24,5
				200	27,2
75%		1,7		error en mediciones	
Semana 3 31/03/2006		25%	1,16	R6	30
	50				8,1
	100				14,2
	200				18,5
	50%	1,37	R6	30	221
				50	144,6
				100	84,3
				200	68,1
	75%	1,7	R2	60	3950
				100	3240
200				2430	

Anexo 5. Datos de las mediciones de densidad y viscosidad cinemática, de las diferentes concentraciones de lodo.

		MEDICIONES DE VISCOSIDAD Y DENSIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LODO.			
Distancia desde el fondo del beaker hasta el disco del husillo (h)= 6,8 cm. Radio del disco del husillo R6 (r) = 0,75 cm. Radio del disco del husillo R2 (r) = 2,45 cm.					
Semana	Concentración, Cw (%)	Densidad, ρ (gr./cm ³)	Husillo	Velocidad angular, ω (RPM)	Viscosidad Cinemática, ν (mm ² /s)
Semana 4 07/04/2006	25%	1,16	R6	30	9,3
				50	7,8
				100	14,2
				200	19,3
	50%	1,37	R6	30	266,8
				50	173,5
				100	101,3
				200	74,7
	75%	1,7	R2	60	3630
				100	3400
				200	2150
	Semana 6	25%	1,17	R6	50
100					13,4
200					20,8
50%		1,31	R6	50	64,4
				100	48,5
				200	47,9
75%		1,72	R2	60	3322
				100	2811,7
				200	2026,5
Semana 7 29/04/2006	25%	1,17	R6	60	10,1
				100	13,1
				200	17,4
	50%	1,31	R6	60	58
				100	44,5
				200	45,1
	75%	1,72	R2	60	3250
				100	2390
				200	1560

Anexo 5. Datos de las mediciones de densidad y viscosidad cinemática, de las diferentes concentraciones de lodo.

		MEDICIONES DE VISCOSIDAD Y DENSIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LODO.			
Distancia desde el fondo del beaker hasta el disco del husillo (h)= 6,8 cm. Radio del disco del husillo R6 (r) = 0,75 cm. Radio del disco del husillo R2 (r) = 2,45 cm.					
Semana	Concentración, Cw (%)	Densidad, ρ (gr./cm ³)	Husillo	Velocidad angular, ω (RPM)	Viscosidad Cinemática, ν (mm ² /s)
Semana 9 12/05/2006	25%	1,17	R6	50	8,1
				60	13,6
				100	18
				200	19,7
	50%	1,39	R6	50	175,2
				60	145,2
				100	102,6
				200	76,4
	75%	1,71	R2	50	2748
				60	2851,9
				100	2300
				200	1545,1



VISCO STAR Plus

Los instrumentos de la serie Visco Star Plus incorporan prestaciones esenciales para determinaciones de viscosidad y otras características reológicas. Son una herramienta imprescindible para controles de calidad y departamentos de investigación.

Características principales



- Visualización de los parámetros en pantalla de cuarzo líquido iluminado.
- Datos en pantalla:
 - Velocidad seleccionada **r.p.m.**
 - Husillo seleccionado **SP**
 - Lectura de viscosidad **cP (mPa·s) ó cSt**
 - Porcentaje de fondo de escala **%**
 - Temperatura de la muestra **°C ó °F**
 - Gradiente de velocidad (con husillos coaxiales) **SR**
 - Esfuerzo cortante (con husillos coaxiales) **SS**
 - Densidad **g/cm³** (introducida manualmente)
- Determinación de viscosidad relativa y absoluta.
- Lectura de viscosidad: viscosidad dinámica (cP ó mPa·s) o viscosidad cinemática (cSt).
- Posibilidad de cambiar las unidades de medida de SI a CGS
- El equipo dispone de 19 velocidades predeterminadas de 0,3 hasta 200 r.p.m.
- Disminución progresiva de la velocidad cada vez que se detiene el equipo, evitando sacudidas bruscas en el eje.
- AUTOTEST del equipo con aviso acústico y visual en caso de funcionamiento incorrecto.
- Sonido de alarma si se trabaja por debajo del 15% del fondo de escala.
- Función de AUTORANGO

- 10 memorias de trabajo.
- Lectura de la temperatura mediante sonda PT100
- Calibración del equipo (viscosidad y de la temperatura) por parte del usuario.
- Comunicación: Interface RS232C, I2C, plotter.
- 8 idiomas de trabajo.
- Software Datalogger. Permite traspasar los datos del viscosímetro a un PC en un formato Excel vía RS232.

Los equipos se suministran completos con maleta de transporte, husillos estándar, base, protector, nuez, y software Datalogger.

VISCO STAR Plus

Características

- Precisión: $\pm 1\%$ del fondo de escala
- Resolución:
Utilizando LCP (Accesorio de baja viscosidad): 0,01
Cuando la viscosidad es inferior a 10.000 cP: 0,1
Cuando la viscosidad es igual o mayor que 10.000 cP: 1
- Repetitividad: 0,2%
- Características de la temperatura:
Márgenes de temperatura:
De 0 °C hasta +100 °C
De +32 °F hasta +212 °F
Resolución: 0.1 °C / 0.1722 °F
Precisión: ± 0.1 °C
Tipo de Sonda: PT100
- Todos los modelos se suministran 100-240 VAC, 50/60 Hz

MODELO	RANGO	VELOCIDAD r.p.m.
VISCO BASIC Plus L	20 - 2.000.000 cP	0,3 - 100
VISCO BASIC Plus R	100 - 13.000.000 cP	0,3 - 100
VISCO BASIC Plus H	3.2 - 1.060.000 Poise	0,3 - 100

Husillos

El diseño de los husillos y los principios de medida de los viscosímetros de Fungilab son como se describen en las normativas **ISO 2555** y **ISO 1652**. Los husillos están fabricados con AISI 316, y se identifican por su número y letra correspondientes, siendo muy sencillo su intercambio según el rango de viscosidad a determinar.



Husillos estándares para modelo L



Husillos estándares para modelos R y H
* El husillo R1 se suministra como accesorio

Anexo 7. Cálculo de la altura de flujo necesaria para producir un caudal y una energía similar a la de un alud torrencial.

El cálculo de la altura de líquido (H) necesaria para producir un caudal y una energía similar a la de un alud torrencial, se basó en lo expresado Ven Te Chow (2000)³⁸ quien manifiesta que en numerosas situaciones de flujo con superficie libre las fuerzas viscosas son pequeñas con respecto a las de gravedad, por lo tanto se considero solo similitud del número de Froude, siendo esto una aproximación donde el número de Froude del modelo debe ser igual al del prototipo para lograr una similitud dinámica aceptable.

Para la determinación de H se supuso un $\lambda_L = 18,1818$, y a partir de la aplicación de la similitud del número de Froude; se obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{V_P^2}{g_P L_P} = \frac{V_m^2}{g_m L_m} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Siendo $g_P = g_m$, la ecuación quedo simplificada en:

$$\frac{V_P}{V_m} = \lambda_L^{1/2} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Haciendo relación entre los caudales del modelo y prototipo, se obtuvo:

$$\frac{Q_P}{Q_m} = \frac{V_P A_P}{V_m A_m} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde: $\frac{A_P}{A_m} = \lambda_L^2$.

Sustituyendo el término anterior y la ecuación 6 en la ecuación 7 se obtuvo:

³⁸ Ven Te Chow. (2000). Hidráulica de Canales Abiertos. Colombia: Nomos S.A.

Anexo 7. Cálculo de la altura de flujo necesaria para producir un caudal y una energía similar a la de un alud torrencial.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda_L^{5/2} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Tomando como prototipo el evento ocurrido en el estado Vargas en el año 1999, donde se registro un caudal de 441,07 m³/s para un T_r = 500 años y sustituyendo el valor de λ_L se obtuvo un caudal para el modelo de 0,31 m³/s.

Considerando la velocidad media del flujo como; $V = \sqrt{2gH}$, la ecuación del caudal queda representada por $Q_m = (\sqrt{2gH})A_m$.

Donde sustituyendo el valor de $A_m = 0,3 \times 0,3 = 0,09 \text{ m}^2$ y del $Q_m = 0,31 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvo el valor de $H = 0,60 \text{ m}$.

CÁLCULO TÍPICO DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA Y TASA DE DEFORMACIÓN.

Viscosidad Dinámica:

$$\mu = (v * \rho) / 1000 \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica, Pa.s.

v : Viscosidad cinemática, mm²/s.

ρ : Densidad del fluido, g./cm³.

Tasa de deformación:

$$\frac{du}{dy} = \frac{(2\pi)r\omega}{60h} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

$\frac{du}{dy}$: Tasa de deformación, 1/s.

r : Radio del husillo, cm.

ω : Velocidad angular, RPM.

h : Distancia del fondo del beaker hasta el disco del husillo, cm.

Para el caso de las mediciones tomadas en la primera semana para el lodo de 25% de concentración, se empleó el husillo R6, cuyo disco del mismo se encontraba a 6,8 cm. del fondo del beaker y tiene un radio de 0,75 cm. La densidad y la viscosidad cinemática medida para 30 RPM fue de, 1,16 g./cm³ y 10,5 mm²/s respectivamente; de estos datos se obtuvieron los siguientes resultados de viscosidad dinámica y tasa de deformación:

$$\mu = (10,5 * 1,16) / 1000 = \mathbf{0,01218 \text{ Pa.s.}}$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{(2\pi * 0,75 * 30)}{(60 * 6,8)} = \mathbf{0,35 \text{ /s.}}$$