

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRAÚLICA Y OBRAS SANITARIAS**



**“ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL  
SEDIMENTO ACUMULADO EN EL SECTOR DE LA OBRA DE  
TOMA DEL EMBALSE SAN JACINTO”**

**Por:**

**JUAN PEDRO ZENTENO GARECA**

**Semestre – II – 2018**

**TARIJA – BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**

**“ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL  
SEDIMENTO ACUMULADO EN EL SECTOR DE LA OBRA DE  
TOMA DEL EMBALSE SAN JACINTO”**

**Por:**

**JUAN PEDRO ZENTENO GARECA**

Proyecto de grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de Ingeniería Civil.

**Semestre – II – 2018**

**TARIJA – BOLIVIA**

**VºBº** .....

Msc. Ing. Ivar Colodro Mendivil

**DOCENTE CIV - 502**

.....

M Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez  
**DECANO FAC. DE CS. Y TEC.**

.....

M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa  
**VICEDECANO FAC. DE CS. Y TEC**

**TRIBUNAL:**

.....

M. Sc. Ing. Henry Monzón De los Ríos

.....

M. Sc. Ing. Oscar Ricaldi Torrez

.....

M. Sc. Ing. Daniel Trigo Orsini

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del (la) autor (a).

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por darme una hermosa familia y permitirme disfrutar de mi ella.

A mis padres, por el esfuerzo y sacrificio realizado día a día, brindándome su infinito apoyo que me permitió culminar mis estudios.

A la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y a la carrera de ingeniería civil por la oportunidad de realizarme como profesional.

A los profesores y docentes, por ser ellos, quienes nos transmiten sus conocimientos y experiencias que permitieron formarme como profesional.

Al Ing. Moisés Perales A., por brindarme su colaboración y asesorarme para la elaboración de este trabajo.

A mis amigos, a mis compañeros de carrera, quienes son testigos del esfuerzo que se requiere lograr culminar la carrera.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres:*

Por el ejemplo de vida, de responsabilidad honradez y respeto, por el cariño y amor, por su apoyo incondicional durante todo este camino recorrido y por su apoyo en todas las etapas de mi vida.

**Muchas Gracias**

*Pedro Zenteno Soliz*

*Mirtha Gareca Vilca*

## **Resumen**

El embalse San Jacinto, desde su puesta en funcionamiento hasta la actualidad, se realizaron mediciones batimétricas en los años: 1989, 1995, 2004, 2013 y 2016.

Ninguno de los levantamientos batimétricos fueron realizados a detalle ni con precisión en la zona donde se sitúa la obra de toma del embalse, mediante la cual, sobre todo en el periodo húmedo, se extrae 16400 litros por segundo para las turbinas generadoras de electricidad a través del túnel de 51 metros de desnivel desde la bocatoma hasta la casa de máquinas. Además de ello, se extrae agua para el sistema de riego a través de bombas hidráulicas desde la plataforma de operación que luego es dirigida a depósitos que suministran el agua a las parcelas integrantes de cada sistema.

A principios del año 2018 se realiza el levantamiento batimétrico de este sector por parte del laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para contar con información actualizada y detallada de este estratégico sector, que permita elaborar estudios que den a conocer los actuales niveles de deposición del sedimento, y que tales estudios puedan establecer el desempeño actual del funcionamiento de la obra de toma del embalse San Jacinto.

Ante la importancia del correcto funcionamiento de esta estructura hidráulica, el presente documento tiene por objetivo realizar un análisis de la distribución tanto espacial como temporal del sedimento acumulado en el sector donde funciona la obra de toma para poder identificar la cantidad y la forma en como el sedimento que se ha acumulado en las proximidades de la compuerta del túnel de aducción de agua y generar información que permita la toma de decisiones y/o los trabajos necesarios para asegurar su correcto funcionamiento durante el resto de vida útil de la toma.

A través de la información batimétrica disponible y la generada para este fin. Se elaboró una cuantificación de volúmenes de agua existentes en el área definida para este estudio, determinación de la cantidad de sedimento ingresado en la zona, un mapa de identificación de patrones de sedimentación, un análisis de variación de niveles de sedimentos en el eje del sendero que direcciona el agua hacia la bocatoma del túnel de aducción.

En el embalse, aproximadamente en los casi 31 años de funcionamiento, específicamente en el sector de la obra de toma ha existido una sedimentación aproximada de 18 694 m<sup>3</sup>. Se estableció además que la tasa de sedimentación anual que ingresa a la zona de la obra de toma es alrededor de 603 m<sup>3</sup>. Esto significó que, en este sector, hubo una disminución cerca del 14 % de su capacidad inicial.

Analizando las secciones transversales como longitudinales generados se determinó que: a lo largo de todo el canal de tierra que direcciona el agua hacia la bocatoma el sedimento acumulado tiene un nivel parejo de 1866 msnm, resultando en una altura de 3 m de sedimentación en este sector que inicialmente era de 1863msnm; en el canal revestido de hormigón que antecede a la bocatoma cuyo nivel de solera corresponde a 1864 msnm, ahora el sedimento en este sector tiene un nivel de 1865 msnm, a 1 m por encima de la solera del canal; También se determinó también que hubo sectores donde fueron completamente rellenos de sedimento con alturas de hasta 12 metros.

Analizando los últimos levantamientos batimétricos se estableció que, el sedimento, luego de haber completamente colmatado por completo los sectores más profundos y quebradas existentes inicialmente, se encuentra casi al mismo nivel, existiendo una tendencia de depositarse de forma laminar.

# INDICE

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>Página</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problema de investigación.....	2
1.2.1. Planteamiento del problema. ....	2
1.2.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación.....	4
<b>CAPÍTULO II</b>	
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Erosión.....	5
2.2.1. Mecanismos de erosión.....	6
2.2.2. Tipos de Erosión y su Control. ....	6
2.2.3. Factores que rigen la erosión. ....	11
2.2.4. Determinación de la pérdida de suelo.....	16
2.3. Transporte de sedimentos.....	17
2.3.1. Clasificación del Transporte de Sedimentos.....	18
2.4. Sedimentación en embalses, procesos, depósito y manejo.....	22
2.4.1. Sedimento que ingresa a un embalse. ....	24
2.4.2. Cálculo del aporte de sedimentos. ....	24

2.4.3.	Criterios de predicción del aporte de sedimento.....	25
2.4.4.	Características de los sedimentos. ....	26
2.4.5.	Métodos para aumentar la vida del embalse.....	29

### **CAPÍTULO III**

3.	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.....	30
3.1.	Ubicación política y geográfica del área de estudio .....	30
3.2.	Delimitación de la zona de estudio.....	33
3.3.	Recopilación de información.....	34
3.4.	Información Topografía.....	35
3.5.	Información batimétrica.....	36
3.5.1.	Batimetría 1989. ....	36
3.5.2.	Batimetría 1995. ....	37
3.5.3.	Batimetría 2004. ....	37
3.5.4.	Batimetría 2013. ....	38
3.5.5.	Batimetría 2016. ....	38
3.6.	Procesamiento de la información existente .....	39

### **CAPÍTULO IV**

4.	CAMPAÑA DE TERRENO.....	45
4.1.	Antecedentes.....	45
4.2.	Objetivo .....	45
4.3.	Descripción de las actividades.....	45
4.4.	Procesamiento de datos obtenidos.....	49
4.5.	Dificultades suscitadas.....	49

## **CAPÍTULO V**

5.	ANÁLISIS .....	51
5.1.	Análisis de volúmenes de agua.....	51
5.1.1.	Discusión de resultados. ....	63
5.2.	Volumen de los sedimentos depositados y análisis de su variación temporal... 67	
5.2.1.	Periodo 1984 -1989.....	67
5.2.2.	Periodo 1989 -1995.....	68
5.2.3.	Periodo 1995 -2004.....	70
5.2.4.	Periodo 2004 -2013.....	71
5.2.5.	Periodo 2013 -2016.....	71
5.2.6.	Periodo 2016 -2018.....	72
5.2.7.	Comparación entre superficies 1984 y 2018 .....	73
5.3.	Distribución espacial del sedimento acumulado en la obra de toma. ....	75
5.3.1.	Modelo Digital del Terreno. ....	76
5.4.	Estudio de la variación de niveles en secciones longitudinales y transversales 86	
5.4.1.	Superficies 2016 – 2018. ....	86
5.4.2.	Superficies 1984 – 2018. ....	88
5.5.	Reducción del volumen útil en el vaso de almacenamiento .....	91

## **CAPÍTULO VI**

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	93
6.1.	Conclusiones.....	93
6.2.	Recomendaciones .....	96
	Referencias .....	98

## **ANEXOS**

## Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Secuencia del proceso de sedimentación.....	5
<i>Figura 2.</i> Mecanismo de erosión por acción del viento. ....	7
<i>Figura 3.</i> Erosión por golpeo de una gota de lluvia. ....	8
<i>Figura 4.</i> Erosión Laminar severa, zona de Khasa Pata Loma, Cuenca de Laka Laka.....	9
<i>Figura 5.</i> Procesos de formación de surcos.....	10
<i>Figura 6.</i> Erosión en surcos.....	10
<i>Figura 7.</i> Vulnerabilidad a la erosión según la tipología de raíces. ....	13
<i>Figura 8.</i> Diagrama de Hjulstrom. ....	15
<i>Figura 9.</i> a) Curva Pendiente - Erosión. b) Relación entre largo de Pendiente Erosión. .	16
<i>Figura 10.</i> Tipos de modelo según Morgan (1997).....	17
<i>Figura 11.</i> Patrón de deposición típico del sedimento al interior de un embalse.....	22
<i>Figura 12.</i> Ubicación geográfica de la presa San Jacinto. ....	31
<i>Figura 13.</i> Imagen satelital del embalse San Jacinto. ....	31
<i>Figura 14.</i> Ubicación de la estructura de la Obra de Toma.....	32
<i>Figura 15.</i> Área sugerida para la realización del servicio batimétrico.....	33
<i>Figura 16.</i> Área delimitada para el estudio. ....	34
<i>Figura 17.</i> Plano del relieve de diseño del embalse. ....	35
<i>Figura 18.</i> Plano de diseño estructural de la obra de toma del embalse. ....	36
<i>Figura 19.</i> Escaneado del plano de diseño de la obra de toma del embalse.....	39
<i>Figura 20.</i> Estructura de la Obra de Toma escaneado.....	40
<i>Figura 21.</i> Plano del relieve del sector de la toma digitalizado. ....	40
<i>Figura 22.</i> Plano escaneado de la estructura de la toma.....	41

<i>Figura 23.</i> Desfase existente entre Datum WGS 84 y Datum PSAD 56. ....	42
<i>Figura 24.</i> Morfología del relieve del sector de la obra de toma del embalse. ....	43
<i>Figura 25.</i> Morfología del relieve del sector de la obra de toma desde otra perspectiva. .	44
<i>Figura 26.</i> Componentes del equipo para medición batimétrica Z-BOAT 1800. ....	46
<i>Figura 27.</i> Líneas de sondeo longitudinales y transversales. ....	47
<i>Figura 28.</i> Equipo Z-Boat realizando el levantamiento batimétrico. ....	48
<i>Figura 29.</i> Manejo del Z-BOAT a través de imagen en tiempo real. ....	48
<i>Figura 30.</i> Superficie de la topografía del año 1984 (Civil 3D). ....	51
<i>Figura 31.</i> Modelo de terreno Digital topografía 1984 (ArcGIS). ....	52
<i>Figura 32.</i> Curva cota – Volumen para topografía 1984. ....	53
<i>Figura 33.</i> Curva cota – Volumen para la batimetría de 1989. ....	55
<i>Figura 34.</i> Curva cota – Volumen para batimetría 1995. ....	56
<i>Figura 35.</i> Curva cota – Volumen correspondiente a batimetría 2004. ....	58
<i>Figura 36.</i> Curva cota – Volumen perteneciente a batimetría 2013. ....	59
<i>Figura 37.</i> Curva Cota – Volumen perteneciente a la batimetría 2016. ....	61
<i>Figura 38.</i> Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 2018. ....	62
<i>Figura 39.</i> Curvas cota – Volumen correspondientes al sector de la obra de toma. ....	63
<i>Figura 40.</i> Variación de volúmenes de agua en el sector de la obra de toma. ....	64
<i>Figura 41.</i> Disminución de capacidad de almacenamiento en el sector de la toma. ....	66
<i>Figura 42.</i> Diferentes perspectivas de la superposición de superficies de 1984 y 1989. ..	68
<i>Figura 43.</i> Superposición de batimetrías de los años 1989-1995. ....	69
<i>Figura 44.</i> Sedimentación – Erosión ocurrida entre el periodo 1989-1995. ....	70
<i>Figura 45.</i> Superposición de superficies de 1984 y 2018. ....	73

<i>Figura 46.</i> Superficie de diferencia entre topografía 1984 y batimetría 2018. ....	75
<i>Figura 47.</i> Superficie Raster topografía 1984. ....	77
<i>Figura 48.</i> Superficie Raster batimetría 2018. ....	78
<i>Figura 49.</i> Raster diferencia de la superposición del “raster1984” y “raster2018”. ....	79
<i>Figura 50.</i> Sector de erosión en la zona de la toma del embalse San Jacinto. ....	80
<i>Figura 51.</i> Zona de sedimentación ladera derecha en el sector de la toma del embalse. ..	82
<i>Figura 52.</i> Zona de sedimentación severa en el sector “Quebrada seca”.....	83
<i>Figura 54.</i> Sedimentación en el canal de conducción de agua hacia la toma. ....	85
<i>Figura 55.</i> Perfil longitudinal de las superficies 2016 y 2018. ....	87
<i>Figura 56.</i> Perfil longitudinal de las superficies 1984 y 2018. ....	89
<i>Figura 57.</i> Nivel anterior y nivel actual del sedimento.....	90
<i>Figura 58.</i> Curva cota almacenamiento año 2025.....	92

## Índice de tablas

Tabla 1. Escala sedimentológica de Udden-Wentworth.....	27
Tabla 2. Valores de $p_{bl}$ y de K, Lane y Koelzer (1953). Lane y Koelzer, (1953). .....	28
Tabla 3. Valores de densidad seca global inicial, Lara y Pemberton (1963).....	29
Tabla 4. Coordenadas de los vértices del área para levantamiento batimétrico 2018. ....	34
Tabla 5. Levantamientos batimétricos realizados anteriormente en el embalse.....	36
Tabla 6. Curva Cota – Volumen para la Topografía del año 1984.....	52
Tabla 7. Volumen de Agua para topografía 1984 a la cota 1884 msnm. ....	54
Tabla 8. Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 1989.....	54
Tabla 9. Volúmenes de Agua para la batimetría de 1989 a la cota 1884 msnm.....	55
Tabla 10. Curva Cota – Volumen para la batimetría 1995. ....	55
Tabla 11. Volúmenes de Agua para batimetría 1995 a la cota 1884 msnm. ....	57
Tabla 12. Curva Cota – Volumen correspondiente a batimetría 2004. ....	57
Tabla 13. Volúmenes de Agua para la batimetría 2004 a la cota 1884 msnm. ....	58
Tabla 14. Curva Cota – Volumen perteneciente a batimetría 2013.....	58
Tabla 15. Volúmenes de Agua para batimetría 2013 a la cota 1884 msnm. ....	60
Tabla 16. Curva Cota – Volumen correspondiente a la batimetría 2016.....	60
Tabla 17. Volúmenes de Agua para la batimetría 2016 a la cota 1884 msnm. ....	61
Tabla 18. Curva Cota – Volumen correspondiente a batimetría 2018. ....	61
Tabla 19. Volúmenes de Agua perteneciente batimetría 2018 a la cota 1884 msnm. ....	62
Tabla 20. Variación de volúmenes de agua en todo el embalse San Jacinto.....	65
Tabla 21. Variación de volúmenes de agua ocurrido sólo para el sector de la toma.....	65
Tabla 22. Disminución de la capacidad de almacenamiento en el sector de la toma. ....	66

Tabla 23. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1984-1989. ....	68
Tabla 24. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1989-1995. ....	69
Tabla 25. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1995-2004. ....	71
Tabla 26. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2004 -2013. ....	71
Tabla 27. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2013 -2016. ....	71
Tabla 28. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 2016 - 2018. ....	72
Tabla 29. Volúmenes Erosión – Sedimentación periodo 1984 - 2018. ....	74
Tabla 30. Valores de sedimentación entre secciones transversales. ....	88
Tabla 31. Volumen de almacenamiento estimado para el año 2025. ....	91

## Índice de Anexos

### **Anexo I. Recopilación y procesamiento de información**

Anexo I. 1. Orden de Compra de la empresa ENDE Guaracahi S.A. ....	1
Anexo I. 2. Equipo utilizado para las batimetrías del embalse San Jacinto. ....	2
Anexo I. 3. Topografía de plano de relieve de 1984 transformada al datum WGS 84.....	5
Anexo I. 4. Curvas de nivel coinciden con el Datum WGS 84. ....	5
Anexo I. 5. Especificaciones técnicas Z-BOAT.....	6

### **Anexo II: Inconvenientes presentados**

Anexo II. 1. Plataforma Flotante al pie de la estructura de la obra de toma.....	7
Anexo II. 2. Acumulación densificada de plantas “Jacintos” en el sector de la toma. ....	7
Anexo II. 3. Limpieza de la zona.....	8
Anexo II. 4. Raíces de “Jacintos” atascadas en las hélices del Z-Boat. ....	8

### **Anexo III: Curvas de nivel del sector de la obra de toma del embalse San Jacinto**

Anexo III. 1. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 1989.....	9
Anexo III. 2. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 1989. ....	9
Anexo III. 3. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 1995.....	10
Anexo III. 4. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 1995. ....	10
Anexo III. 5. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 2004.....	11
Anexo III. 6. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 2004. ....	11
Anexo III. 7. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 2013.....	12
Anexo III. 8. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 2013. ....	12
Anexo III. 9. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 2016.....	13
Anexo III. 10. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 2016. ....	13

Anexo III. 11. Curvas nivel sector obra toma Batimetría 2018..... 14

Anexo III. 12. Modelo de terreno digital sector obra de toma, batimetría 2018. .... 14

**Anexo IV: Sobre posición entre superficies batimétricas**

Anexo IV. 1. Vistas tridimensionales de superficies 1989 y 1995..... 15

Anexo IV. 2. Vistas tridimensionales de superficies 1995 y 2004..... 15

Anexo IV. 3. Vistas tridimensionales de superficies 2004 y 2013..... 16

Anexo IV. 4. Vistas tridimensionales de superficies 2013 y 2016..... 16

Anexo IV. 5. Vistas tridimensionales de superficies 2016 y 2018..... 17

Anexo IV. 6. Vistas tridimensionales de superficies 1984 y 2018..... 18

**Anexo V. Información del levantamiento batimétrico del año 2016**

Anexo V. 1. Perfiles levantados en el embalse San Jacinto de la batimetría 2016. .... 19

Anexo V. 2. Perfil transversal de sondeo B1-B1' batimetría 2016. .... 19

Anexo V. 3. Volúmenes del embalse gestión 2016. .... 20

Anexo V. 4. Zona de impedimento de medición de profundidades. .... 21

**Anexo VI: Perfiles Longitudinales y Transversales superficies 1984-2018**

Anexo VI. 1. Comparación entre superficies 1984-2018. .... 22

Anexo VI. 2. Sección transversal A1-A'1 ..... 23

Anexo VI. 3. Sección transversal A2-A'2..... 24

Anexo VI. 4. Sección transversal A3-A'3..... 25

Anexo VI. 5. Sección transversal A4-A'4..... 26

Anexo VI. 6. Sección transversal A5-A'5..... 27

Anexo VI. 7. Sección transversal A6-A'6..... 28

Anexo VI. 8. Sección transversal A7-A'7..... 29

Anexo VI. 9. Sección transversal A8-A'8. ....	30
Anexo VI. 10. Sección transversal A9-A'9. ....	31
Anexo VI. 11. Sección transversal A10-A'10. ....	32
<b>Anexo VII: Perfiles Longitudinales y Transversales superficies 2013-2016-2018</b>	
Anexo VII. 1. Comparación Superficies 2013-2016-2018. ....	33
Anexo VII. 2. Perfil longitudinal entre las superficies 2013, 2016 y 2018. ....	34