

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN  
LA CIUDAD DE COTAGAITA DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ  
APLICANDO EL MODELO IBER”**

**Por:**

**ADRIANA ÁNGELA DÉBORA VALENZUELA BELÉN**

**Semestre I - 2022**

**Tarija - Bolivia**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN  
LA CIUDAD DE COTAGAITA DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ  
APLICANDO EL MODELO IBER”**

**Por:**

**ADRIANA ÁNGELA DEBORA VALENZUELA BELÉN**

**PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA DE  
CIV-502 (MENCIÓN DE HIDRÁULICA)**

**Semestre I - 2022**

**Tarija – Bolivia**

*Lamento que ese día nadie estuvo  
ahí para levantarte en sus brazos  
de la forma en que tú levantaste a  
otros en los tuyos. ¿Y entonces?  
¿qué fue de ti?*

*No pude salvarte en ese entonces,  
déjame salvarte ahora.*

# ÍNDICE

|   |          |
|---|----------|
| <b>CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....</b>               | <b>1</b> |
| 1.1. Antecedentes .....                                 | 1        |
| 1.2. El Problema.....                                   | 3        |
| 1.2.1. Planteamiento .....                              | 3        |
| 1.2.2. Formulación.....                                 | 3        |
| 1.2.3. Sistematización.....                             | 3        |
| 1.3. Objetivos .....                                    | 4        |
| 1.3.1. Objetivo General.....                            | 4        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                      | 4        |
| 1.4. Justificación .....                                | 4        |
| 1.4.1. Teórica .....                                    | 4        |
| 1.4.2. Metodológica.....                                | 5        |
| 1.4.3. Práctica .....                                   | 5        |
| 1.5. Hipótesis .....                                    | 5        |
| <b>CAPÍTULO II MARCO DE REFERENCIA .....</b>            | <b>6</b> |
| 2.1. Marco Teórico.....                                 | 6        |
| 2.1.1. Modelo IBER.....                                 | 6        |
| 2.1.2. Modelación matemática.....                       | 6        |
| 2.1.3. Ecuaciones de Saint-Venant .....                 | 7        |
| 2.1.4. Solución de las ecuaciones de Saint-Venant ..... | 13       |
| 2.1.5. Condiciones de contorno hidrodinámicas .....     | 16       |
| 2.2. Marco Conceptual.....                              | 18       |
| 2.2.1. Flujo en canales abiertos.....                   | 18       |
| 2.2.2. Inundación .....                                 | 18       |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 2.2.3.  | Modelo de elevación digital (DEM).....                         | 20        |
| 2.2.4.  | Satélite ALOS PALSAR .....                                     | 20        |
| 2.2.5.  | Rugosidad.....   | 22        |
| 2.2.6.  | Modelación Hidrológica.....                                    | 22        |
| 2.2.7.  | Modelo HEC-HMS.....  | 22        |
| 2.3.  | Marco Espacial .....   | 25        |
| 2.3.1.  | Ubicación.....   | 25        |
| 2.3.2.  | Contexto Histórico.....  | 27        |
| 2.4.  | Marco Temporal .....   | 28        |
| 2.4.1.  | Periodo de estudio .....                                       | 28        |
| <b>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO .....</b>      |  | <b>29</b> |
| 3.1.  | Tipo y enfoque de investigación.....                           | 29        |
| 3.2.  | Materiales.....  | 29        |
| 3.3.  | Métodos y técnicas de investigación.....                       | 29        |
| 3.4.  | Operacionalización de variables .....                          | 30        |
| 3.5.  | Recolección de información .....                               | 30        |
| 3.5.1.  | Geometría .....  | 30        |
| 3.5.2.  | Rugosidad.....   | 31        |
| 3.5.3.  | Caudales .....   | 31        |
| 3.6.  | Periodo de retorno.....  | 33        |
| 3.7.  | Análisis e interpretación de los resultados.....               | 33        |
| <b>CAPÍTULO IV ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS .....</b> |  | <b>34</b> |
| 4.1.  | Delimitación de la cuenca.....                                 | 34        |
| 4.2.  | Parámetros geomorfológicos de la cuenca del Río Cotagaita..... | 36        |
| 4.2.1.  | Parámetro de forma .....                                       | 36        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 4.2.2.   | Parámetros de relieve.....  | 40        |
| 4.2.3.   | Sistema de drenaje .....  | 44        |
| 4.2.4.   | Tiempo de concentración.....                                      | 46        |
| 4.3.   | Número de curva y datos de tormenta .....                         | 48        |
| 4.4.   | Análisis de consistencia .....                                    | 51        |
| 4.4.1.   | Análisis doble masa .....   | 51        |
| 4.4.2.   | Resumen de los análisis de consistencia.....                      | 51        |
| 4.5.   | Análisis de homogeneidad .....                                    | 52        |
| 4.5.1.   | Test de Mann-Kendall .....  | 52        |
| 4.5.2.   | Análisis de las estaciones .....                                  | 52        |
| 4.5.3.   | Resumen de resultados test de Mann Kendall .....                  | 54        |
| 4.6.   | Determinación de curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia..... | 54        |
| 4.6.1.   | Estación Atocha.....  | 55        |
| 4.6.2.   | Estación Cotagaita .....  | 57        |
| 4.6.3.   | Estación Ñoquejza .....   | 58        |
| 4.6.4.   | Estación Ramadas.....   | 60        |
| 4.6.5.   | Estación Salo .....   | 62        |
| 4.6.6.   | Estación Tica Tica .....  | 63        |
| 4.7.   | Tormenta de proyecto .....  | 65        |
| 4.7.1.   | Método del bloque alterno.....                                    | 65        |
| 4.7.2.   | Factor de Reducción por Área (FRA).....                           | 66        |
| 4.7.3.   | Hidrogramas .....   | 67        |
| 4.8.   | Uso de Suelos.....  | 69        |
| 4.8.1.   | Rugosidad .....   | 70        |
| <b>CAPÍTULO V CARACTERIZACIÓN DEL MODELO .....</b> |   | <b>71</b> |
| 5.1.   | Características del modelo de simulación IBER.....                | 71        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 5.2.  | Formato de archivos.....                               | 71        |
| 5.3.  | Creación del proyecto .....                            | 71        |
| 5.4.  | Modelo digital de elevación.....                       | 72        |
| 5.5.  | Construcción de la malla de cálculo .....              | 73        |
| 5.6.  | Condiciones de contorno .....                          | 74        |
| 5.7.  | Coeficiente de rugosidad .....                         | 75        |
| 5.8.  | Cálculo del modelo bidimensional .....                 | 76        |
| 5.9.  | Resultados de la modelación hidrodinámica.....         | 78        |
| 5.9.1.                                      | Áreas de inundación .....                              | 78        |
| 5.9.2.                                      | Análisis de los resultados .....                       | 79        |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> |  | <b>81</b> |
|   | Conclusiones.....                                      | 81        |
|   | Recomendaciones .....                                  | 82        |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>     |  | <b>83</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                         |  | <b>88</b> |
| Anexo A.                                    | Mapa de Estaciones, Subcuencas y Polígono de Thiessen. |           |
| Anexo B.                                    | Mapa de Elevaciones de la Cuenca.                      |           |
| Anexo C.                                    | Mapa del Orden de Afluentes.                           |           |
| Anexo D.                                    | Mapa de Uso de Suelos.                                 |           |
| Anexo E.                                    | Mapa de Número de Curva.                               |           |
| Anexo F.                                    | Análisis de Consistencia de Estaciones.                |           |
| Anexo G.                                    | Análisis de Homogeneidad.                              |           |
| Anexo H.                                    | Hietogramas por el Método del Bloque Alterno.          |           |
| Anexo I.                                    | Comparación de Caudales.                               |           |
| Anexo J.                                    | Mapa de suelos: área de estudio.                       |           |
| Anexo K.                                    | Mapas de Inundación para T= 5, 50 y 75 años.           |           |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Características del satélite ALOS PALSAR.</i> .....   | 21 |
| Tabla 2. <i>Municipios de afectación recurrente a inundación 2006-2010.</i> .....   | 28 |
| Tabla 3. <i>Estaciones para la cuenca del río Cotagaita.</i> .....  | 33 |
| Tabla 4. <i>Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño.</i> .....   | 36 |
| Tabla 5. <i>Clasificación a partir del factor de forma.</i> .....   | 38 |
| Tabla 6. <i>Valores interpretativos del Índice de forma.</i> .....  | 39 |
| Tabla 7. <i>Pendientes de la cuenca.</i> .....  | 41 |
| Tabla 8. <i>Tabla de curva hipsométrica.</i> .....  | 42 |
| Tabla 9. <i>Longitud y número de afluentes de acuerdo a su orden.</i> .....   | 45 |
| Tabla 10. <i>Resumen de tiempos de concentración y parámetros de cálculo.</i> .....   | 48 |
| Tabla 11. <i>Número de curva ponderado.</i> .....   | 48 |
| Tabla 12. <i>Número de curva para de las sub cuencas CN(II).</i> .....  | 49 |
| Tabla 13. <i>Datos de número curva, retención potencial máxima, abstracción potencial y tiempo de retardo para las subcuencas del proyecto.</i> ..... | 50 |
| Tabla 14. <i>Resumen de resultados análisis de consistencia.</i> .....  | 52 |
| Tabla 15. <i>Precipitaciones máximas e índice de desviación Atocha.</i> .....   | 53 |
| Tabla 16. <i>Valores de varianza crítica para diferentes niveles de significancia.</i> .....  | 54 |
| Tabla 17. <i>Resumen del análisis de homogeneidad.</i> .....  | 54 |
| Tabla 18. <i>Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Atocha.</i> .....  | 55 |
| Tabla 19. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Atocha.</i> .....   | 56 |
| Tabla 20. <i>Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Cotagaita.</i> .....   | 57 |
| Tabla 21. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Cotagaita.</i> .....  | 57 |
| Tabla 22. <i>Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Ñoquejza.</i> .....  | 58 |
| Tabla 23. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Ñoquejza.</i> .....   | 59 |
| Tabla 24. <i>Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Ramadas.</i> .....   | 60 |
| Tabla 25. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Ramadas.</i> .....  | 61 |
| Tabla 26. <i>Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Salo.</i> .....  | 62 |
| Tabla 27. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Salo.</i> .....   | 62 |
| Tabla 28. <i>Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Tica Tica.</i> .....   | 63 |
| Tabla 29. <i>Intensidad y duración de lluvias, estación Tica Tica.</i> .....  | 64 |
| Tabla 30. <i>Factor de Reducción de Área para subcuencas del estudio.</i> .....   | 66 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 31. <i>Rugosidades</i> .....                                       | 70  |
| Tabla 32. <i>Áreas de afectación para T = 5 años</i> . ....              | 78  |
| Tabla 33. <i>Áreas de afectación para T = 50 años</i> . ....             | 78  |
| Tabla 34. <i>Áreas de afectación para T = 75 años</i> . ....             | 79  |
| Tabla 35. <i>Análisis de consistencia estación Atocha</i> . ....         | 94  |
| Tabla 36. <i>Análisis de consistencia estación Cotagaita</i> . ....      | 95  |
| Tabla 37. <i>Análisis de consistencia estación Ñoquejza</i> . ....       | 96  |
| Tabla 38. <i>Análisis de consistencia estación Ramadas Potosí</i> . .... | 97  |
| Tabla 39. <i>Análisis de consistencia estación Salo</i> . ....           | 99  |
| Tabla 40. <i>Análisis de consistencia estación Tica Tica</i> . ....      | 100 |

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. <i>Gráfico del flujo en plano vertical</i> . ....   | 12 |
| Figura 2. <i>Proceso de discretización</i> . ....   | 14 |
| Figura 3. <i>Ejemplo de malla estructurada</i> . ....   | 15 |
| Figura 4. <i>Ejemplo de malla no estructurada</i> . ....  | 15 |
| Figura 5. <i>Ejemplo de visualización de resultados</i> . ....  | 17 |
| Figura 6. <i>El Niño/La Niña y episodios neutros y su impacto en el PIB agrícola en miles de bolivianos en 1990</i> ..... | 19 |
| Figura 7. <i>Esquema de trabajo HEC-HMS</i> . ....  | 23 |
| Figura 8. <i>Zona de Estudio Ciudad de Cotagaita</i> . ....   | 25 |
| Figura 9. <i>Mapa de ubicación de la provincia Nor Chichas</i> . ....   | 26 |
| Figura 10. <i>N° de pérdidas humanas por cada 100.000 afectados por inundación en países de Sudamérica</i> . ....         | 27 |
| Figura 11. <i>Esquema de pasos en ArcGIS para la obtención de las características morfométricas de la cuenca</i> .....    | 31 |
| Figura 12. <i>Flujograma del proceso del HEC-HMS para la obtención de hidrogramas</i> .....                               | 32 |
| Figura 13. <i>Mapa de la delimitación de la Cuenca de Cotagaita</i> .....   | 35 |
| Figura 14. <i>Mapa Red Hídrica de Cotagaita</i> . ....  | 37 |
| Figura 15. <i>Curva hipsométrica</i> . ....   | 43 |
| Figura 16. <i>Curvas Hipsométricas características del ciclo de erosión</i> .....   | 43 |
| Figura 17. <i>Perfil del río principal</i> . ....   | 44 |
| Figura 18. <i>Curvas IDF, estación Atocha</i> . ....  | 56 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 19. <i>Curvas IDF, estación Cotagaita.</i> .....                                   | 58  |
| Figura 20. <i>Curvas IDF, estación Ñoquejza.</i> .....                                    | 59  |
| Figura 21. <i>Curvas IDF, estación Ramadas.</i> .....                                     | 61  |
| Figura 22. <i>Curvas IDF, estación Salo.</i> .....  | 63  |
| Figura 23. <i>Curvas IDF, estación Tica Tica.</i> .....                                   | 65  |
| Figura 24. <i>Ventana de proceso HEC-HMS.</i> .....                                       | 67  |
| Figura 25. <i>Hidrograma T = 5 años.</i> .....  | 68  |
| Figura 26. <i>Hidrograma T = 50 años</i> .....  | 68  |
| Figura 27. <i>Hidrograma T = 75 años.</i> .....   | 69  |
| Figura 28. <i>Ventana creación del proyecto.</i> .....                                    | 72  |
| Figura 29. <i>Barra de herramientas, crear RTIN.</i> .....                                | 73  |
| Figura 30. <i>Ventana de proceso de construcción de la malla de cálculo.</i> .....        | 74  |
| Figura 31. <i>Ventana condiciones de contorno, ingreso de caudales T = 75 años.</i> ..... | 74  |
| Figura 32. <i>Ventana ingreso del hidrograma T = 5 años.</i> .....                        | 75  |
| Figura 33. <i>Ventana ArcGIS, rugosidades.</i> .....                                      | 76  |
| Figura 34. <i>Ventana de proceso.</i> .....   | 76  |
| Figura 35. <i>Ventanas con opciones de visualización.</i> .....                           | 77  |
| Figura 36. <i>Ventana de visualización profundidades máximas.</i> .....                   | 77  |
| Figura 37. <i>Viviendas de la ciudad de Cotagaita.</i> .....                              | 80  |
| Figura 38. <i>Mapa de Estaciones, Subcuencas y Polígono de Thiessen.</i> .....            | 89  |
| Figura 39. <i>Mapa de Elevaciones de la Cuenca.</i> .....                                 | 90  |
| Figura 40. <i>Mapa de Orden de Afluentes.</i> .....                                       | 91  |
| Figura 41. <i>Mapa del Número de Curva.</i> .....   | 92  |
| Figura 42. <i>Mapa de Uso de Suelos.</i> .....  | 93  |
| Figura 43. <i>Curva doble masa Atocha.</i> .....  | 95  |
| Figura 44. <i>Curva doble masa Cotagaita.</i> .....                                       | 96  |
| Figura 45. <i>Curva doble masa Ñoquejza.</i> .....  | 97  |
| Figura 46. <i>Curva doble masa Ramadas Potosí.</i> .....                                  | 99  |
| Figura 47. <i>Curva doble masa Salo.</i> .....  | 100 |
| Figura 48. <i>Curva doble masa estación Tica Tica.</i> .....                              | 101 |