

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Carrera de Ingeniería Civil

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA E
HIDRÁULICA DEL COMPORTAMIENTO
DE LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA
DURANTE EL EVENTO
EXTRAORDINARIO DE FEBRERO-MARZO
DE 2014”**

Autor: Luis Ignacio Bas

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Supervisor externo: Msc. Ing. José Manuel Díaz Lozada

AÑO 2016

Título: Modelación hidrológica e hidráulica del comportamiento de la cuenca del Río Ctalamochita durante el evento extraordinario de febrero-marzo de 2014.

Apellido: Bas

Nombres: Luis Ignacio

Carrera: Ingeniería Civil

Matricula: 35.055.154

Palabras Claves: río Tercero, Modelación hidrológica, Modelación hidráulica, evento extraordinario del 14 de febrero de 2014.

RESUMEN

La cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) se encuentra ubicada en el centro-oeste de la Provincia de Córdoba, en las Sierras de Comechingones, siendo ésta una de las cuencas con más aprovechamientos hidroeléctricos en la provincia (seis en total). A partir del embalse del Río Tercero (único embalse con capacidad de regulación dentro del sistema), el río empieza a recorrer la cuenca media y baja atravesando importantes localidades, las cuales presentan riesgos de inundación cuando los caudales erogados por el mismo presentan cierta magnitud. Puntualmente, en el mes de febrero de 2014 y fechas posteriores, se registraron crecidas de importancia sobre el río Tercero (Ctalamochita), debido a las precipitaciones extraordinarias caídas en toda la cuenca, las cuales generaron un escurrimiento superficial que produjo la inundación de zonas urbanas y rurales (más de un millón de hectáreas inundadas) provocando daños de importancia. Para poder mitigar estas problemáticas sin realizar acciones que produzcan deterioros importantes, es necesario realizar un manejo sustentable de la cuenca. Para ello es necesario en un primer momento caracterizar la misma, cuantificar las precipitaciones y los caudales escurridos. Un evento de importancia ocurrido en la cuenca fue el del día 14 de febrero de 2014 que produjo los daños importantes en donde debido a diferentes estudios pudo conocerse varios aspectos a tener en cuenta a futuro para evitar inundaciones ribereñas.

En este trabajo se realiza una modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita), con el objeto de determinar la escorrentía superficial producida por las precipitaciones registradas el día 14 de febrero de 2014 y calibrar un modelo hidrológico para servir de información complementaria para el manejo del embalse de Río Tercero. Además se efectuó un modelo hidráulico del río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Bell Ville con el objeto de determinar los niveles de inundación alcanzados en el evento estudiado y calibrar el modelo para servir de apoyo para tomar las medidas necesarias en los sectores críticos que fueron más afectados.

Los resultados obtenidos permitieron cuantificar los caudales ingresados al embalse de Río Tercero durante el evento del día 14 de febrero de 2014. Con el modelo calibrado las autoridades de gestión pueden simular diferentes eventos hipotéticos y servir de apoyo al manejo de embalses. Con respecto a los resultados obtenidos de la modelación hidráulica de Bell Ville, se obtuvo el mapa de inundación para el pico de la crecida que arribo en dicha localidad el día 05/03/2014, el cual fue calibrado con los datos recolectados en campo. Con el modelo hidráulico calibrado las autoridades de gestión poseen una herramienta de apoyo para determinar las medidas estructurales y no estructurales para mitigar el riesgo de inundación.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a la Universidad Nacional de Córdoba la oportunidad de desarrollarme tanto académica como personalmente de forma gratuita en una de las primeras y más importantes casas de estudios de América, contando con más de 400 años de historia y alto prestigio internacional.

También agradecer a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por el excelente nivel profesional, académico y humano que ofrece cada día para formar profesionales de algunas de las áreas más importantes para el desarrollo de la sociedad Argentina.

Un importante agradecimiento al Dr. Ing. Carlos Marcelo García que me otorgo la posibilidad de realizar esta Práctica Profesional Supervisada, brindando siempre todo su apoyo, tiempo, conocimiento, pasión por esta hermosa carrera que es la ingeniería civil y permitiéndome realizarla en un importante centro académico y tecnológico como es el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y todo el equipo humano que la compone.

Agradecer al Mg. Ing. José Manuel Díaz Lozada que en su calidad de tutor acompaño todo el proceso con una gran calidad académica y en especial humana, brindando su tiempo, dedicación, paciencia y conocimientos para guiarme en la obtención del mejor resultado posible.

Un especial agradecimiento a mi familia, en primer lugar, mi mamá Adriana Cerato por el incondicional apoyo que me ha brindado durante toda mi vida, así como también enseñanzas y valores que me han permitido desarrollarme tanto profesional como humanamente, siendo siempre ella un ejemplo de vida a seguir. Así como también lo han sido mis queridos hermanos Candelaria y Facundo de quienes sé que siempre tengo la bendición de contar con ellos.

Agradecer enormemente a mi compañera de vida Julieta Romero que me ha acompañado en todo este recorrido con un apoyo y amor incondicional, siempre mirando juntos hacia adelante y que agradezco toda la vida que Dios la haya puesto al lado mío.

A todos mis compañeros y ante todo amigos de la facultad que siempre colaboraron, tanto dentro como fuera de la facultad, en esta importante y hermosa etapa de vida. Ellos son Cristhian Rodríguez, Lucas Cisternas, Bernardo Derendinger, Leonardo Matwiczkyk, Guillermo Guerra, Maximilian Stabler, Tomas Callerio, Alejandro Giorgis, Guillermo Bobone, Javier Chipolla y Valentina Zorat. Finalmente, un agradecimiento a Gastón Sánchez Conci, mi compañero en la realización de la presente practica supervisada, con el que logramos trabajar de gran manera superando ampliamente las expectativas iniciales.

Especial agradecimiento a mis amigos de toda la vida Santiago Gómez y Tomas Viñas, con los que hemos compartido una vida juntos y con quienes puedo siempre contar.

A mi abuela por todo el incondicional cariño que me ha dado a lo largo de la vida y a mi abuelo, una de las personas que más admiro.

Finalmente agradecer a mi padre.

Capítulo I: Marco Referencial del Trabajo.....	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Descripción del área de estudio.....	12
1.3 Problemática existente.....	13
1.4 Estudios antecedentes.....	14
1.5 Objetivos.....	15
1.5.1 Objetivos generales.....	15
1.5.2 Objetivos específicos.....	15
1.6 Metodología.....	16
Capítulo II: Caracterización de la Cuenca en Estudio.....	18
2.1 Introducción.....	18
2.2 Visita de reconocimiento a campo.....	18
2.3 Herramientas informáticas utilizadas para caracterizar la cuenca.....	20
2.3.1 Modelo digital del terreno SRTM.....	20
2.3.2 Índice NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada).....	21
2.4 Delimitación de la cuenca y subcuencas de estudio.....	22
2.5 Delimitación de la red de escurrimiento.....	24
2.6 Determinación del mapa de NDVI.....	25
2.7 Tiempo de concentración.....	27
Capítulo III: Elaboración del Modelo Hidrológico.....	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Determinación de parámetros hidrológicos.....	37
3.2.1 Curva Número (CN) de cada subcuenca.....	37
3.2.2 Hidrograma unitario de Clark.....	50
3.3 Distribución temporal y espacial de la lluvia.....	51
3.3.1 Datos.....	51
3.3.2 Distribución espacial - Polígonos de Thiessen.....	51
3.3.3 Distribución temporal.....	53
3.4 Descripción del modelo utilizado: HEC-HMS.....	54
Capítulo IV: Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014.....	59
4.1 Introducción.....	59
4.2 Condiciones existentes en la cuenca durante el evento.....	59

4.2.1 Condiciones existentes de lluvia.	59
4.2.2 Condiciones existentes de embalses.....	60
4.3 Calibración de los parámetros hidrológicos.	61
4.3.1 Modelo de infiltración (CN).....	61
4.3.2 Modelo de transformación lluvia-caudal (Hidrograma unitario de Clark). 62	
4.4 Resultados obtenidos.....	63
Capítulo V: Elaboración de un modelo hidráulico para reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014.....	68
5.1 Introducción.	68
5.2 Modelo hidrológico provisto por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba.	68
5.3 Determinación de parámetros hidráulicos.....	69
5.3.1 “n” de Manning.....	69
5.3.2 Áreas de flujo inefectivo.	69
5.3.3 Condiciones de borde.	70
5.4 Descripción del modelo realizado HEC-RAS.	71
Capítulo VI: Calibración y resultados obtenidos del modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en el mes de Marzo de 2014	73
6.1 Introducción.	73
6.2 Condiciones existentes en el Río Tercero (Ctalamochita).....	73
6.3 Calibración del modelo hidráulico.....	74
6.4 Resultados obtenidos y mapa de inundación.	74
Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones	77
7.1 Conclusiones.....	77
7.2 Conclusión personal.	80

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).....	12
Figura 2: Cuenca del río Carcaraña junto a su red hidrográfica.....	13
Figura 3: Inundaciones en Ciudad de Bell Ville en febrero de 2014.....	14
Figura 4: Uso rural en el sector sur de la cuenca	18
Figura 5: Vegetación existente en el sector oeste de la cuenca, Villa Yacanto.....	18
Figura 6: Medición ADCP en el río Santa Rosa el día 04/03/2015	19
Figura 7: Ubicación de sitios de medición.....	19
Figura 8: Modelo Digital del Terreno cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).....	20
Figura 9: Curvas de nivel de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)	21
Figura 10: Delimitación de la cuenca alta del río Ctalamochita.....	22
Figura 11: Cuencas correspondientes a los tributarios del embalse de Río Tercero.....	22
Figura 12: Detalle de división en subcuencas	23
Figura 13: Red de escurrimiento de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).....	24
Figura 14: Mapa NDVI cuenca Amboy.....	25
Figura 15: Mapa NDVI cuenca Santa Rosa	25
Figura 16: Mapa NDVI cuenca Quillinzo.....	26
Figura 17: Mapa NDVI cuenca Río Grande	26
Figura 18: Mapa NDVI cuenca Planicie.....	27
Figura 19: Mapa NDVI cuenca La Cruz.....	27
Figura 20: Solución de las ecuaciones de escurrimiento del SCS (Chow V.T., 1994)	38
Figura 21: Subcuencas de la cuenca Santa Rosa	40
Figura 22: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 1 de cuenca Santa Rosa.....	40
Figura 23: Mapa NDVI Santa Rosa subcuenca 2 de cuenca Santa Rosa	40
Figura 24: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 3 de cuenca Santa Rosa.....	41
Figura 25: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 4 de cuenca Santa Rosa.....	41
Figura 26: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 5 de cuenca Santa Rosa.....	41
Figura 27: Cuenca de arroyo Amboy y mapa NDVI.....	42
Figura 28: Subcuencas de la cuenca río Grande.....	42
Figura 29: Mapa NDVI Grande Subcuenca 1 de cuenca Río Grande	43
Figura 30: Mapa NDVI Grande Subcuenca 2 de cuenca Río Grande	43
Figura 31: Mapa NDVI Grande Subcuenca 3 de cuenca Río Grande	43
Figura 32: Mapa NDVI Grande Subcuenca 4 de cuenca Río Grande	44
Figura 33: Mapa NDVI Grande Subcuenca 5 de cuenca Río Grande	44
Figura 34: Mapa NDVI Grande Subcuenca 6 de cuenca Río Grande	44
Figura 35: Mapa NDVI Grande Subcuenca 7 de cuenca Río Grande	45
Figura 36: Subcuencas de cuenca Quillinzo	45
Figura 37: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 1 de cuenca Quillinzo	46
Figura 38: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 2 de cuenca Quillinzo	46
Figura 39: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 3 de cuenca Quillinzo	46
Figura 40: Subcuencas de cuenca La Cruz	47
Figura 41: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 1 de cuenca La Cruz	47
Figura 42: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 2 de cuenca La Cruz	47
Figura 43: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 3 de cuenca La Cruz	48
Figura 44: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 4 de cuenca La Cruz	48

Figura 45: Subcuencas de cuenca Planicie	49
Figura 46: Mapa NDVI Planicie Subcuenca 1 de cuenca Planicie	49
Figura 47: Mapa NDVI Planicie Subcuenca 2 de cuenca Planicie	49
Figura 48: Polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones pluviométricas de la cuenca del Río Tercero	52
Figura 49: Distribución porcentual de lámina para la estación La Suela para 12 hs	53
Figura 50: Curva Cota-Área de embalse Cerro Pelado	54
Figura 51: Curva Cota-Área de embalse Arroyo Corto	54
Figura 52: Curva Cota-Descarga de embalse Arroyo Corto.....	55
Figura 53: Curva Cota-Descarga de embalse Cerro Pelado.....	55
Figura 54: Curva Cota-Descarga de embalse Río Tercero.....	55
Figura 55: Curva Cota-Volumen de embalse Arroyo Corto.....	56
Figura 56: Curva Cota-Volumen de embalse Cerro Pelado.....	56
Figura 57: Curva Cota-Volumen de embalse Río Tercero.....	56
Figura 58: Modelo hidrológico de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)	57
Figura 59: Distribución temporal de lámina de lluvia.....	60
Figura 60: Regla de 5 metros demarcando crecida de río Quillinzo.....	63
Figura 61: Hidrogramas de afluentes de embalse río Tercero.....	64
Figura 62: Variación volumétrica del embalse Río Tercero.	65
Figura 63: Variación de altura del embalse río Tercero.	65
Figura 64: Hidrogramas de salida modelado y observado del embalse Río Tercero.	66
Figura 65: Detalle de tramo en análisis por HEC-RAS.....	68
Figura 66: Fotografía de río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Bell Ville	69
Figura 67: Detalle de áreas de flujo inefectivo	70
Figura 68: Curva H-Q de la sección en el puente Sturla	70
Figura 69: Modelo hidráulico del río Tercero (Ctalamochita), sección Bell Ville	71
Figura 70: Mapa de inundación de la localidad de Bell Ville	75

Índice de Tablas

Tabla 1: Caudales aforados durante la campaña del día 15 de marzo de 2015	20
Tabla 2: Áreas de subcuencas de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).....	23
Tabla 3: Datos de las subcuencas: altitudes, longitud de cauce y pendiente.....	24
Tabla 4: Correspondencia entre valores de NDVI y vegetación existente.....	25
Tabla 5: Valores de NDVI de la cuenca Amboy y cantidad de Counts	26
Tabla 6: Valores de NDVI de la cuenca Santa Rosa y cantidad de Counts.....	26
Tabla 7: Valores de NDVI de la cuenca Quillinzo y cantidad de Counts	26
Tabla 8: Valores de NDVI de la cuenca Río Grande y cantidad de Counts.....	26
Tabla 9: Valores de NDVI de la cuenca Planicie y cantidad de Counts	27
Tabla 10: Valores de NDVI de la cuenca La Cruz y cantidad de Counts.....	27
Tabla 11: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 1	29
Tabla 12: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 2	29
Tabla 13: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 3	30
Tabla 14: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 4	30
Tabla 15: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 5	30
Tabla 16: Tiempo de concentración Amboy	31
Tabla 17: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 1	31
Tabla 18: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 2	31
Tabla 19: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 3	32
Tabla 20: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 4	32
Tabla 21: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 5	32
Tabla 22: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 6	32
Tabla 23: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 7	33
Tabla 24: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 1	33
Tabla 25: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 2	33
Tabla 26: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 3	34
Tabla 27: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 1	34
Tabla 28: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 2	34
Tabla 29: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 3	35
Tabla 30: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 4	35
Tabla 31: Tiempo de concentración Planicie Subcuenca 1	35
Tabla 32: Tiempo de concentración Planicie Subcuenca 2	35
Tabla 33: Valores de CN según el uso del suelo (Chow V.T., 1994)	39
Tabla 34: Cálculo de valor de CN de Santa Rosa Subcuenca 1	40
Tabla 35: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 2	40
Tabla 36: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 3	41
Tabla 37: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 4	41
Tabla 38: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 5	41
Tabla 39: Cálculo de CN de cuenca arroyo Amboy	42
Tabla 40: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 1	43
Tabla 41: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 2	43
Tabla 42: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 3	43
Tabla 43: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 4	44
Tabla 44: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 5	44

Tabla 45: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 6.....	44
Tabla 46: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 7.....	45
Tabla 47: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 1.....	46
Tabla 48: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 2.....	46
Tabla 49: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 3.....	46
Tabla 50: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 1.....	47
Tabla 51: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 2.....	47
Tabla 52: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 3.....	48
Tabla 53: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 4.....	48
Tabla 54: Cálculo de CN de Planicie Subcuenca 1.....	49
Tabla 55: Cálculo de CN de Planicie Subcuenca 2.....	49
Tabla 56: Valor de "k" de Clark de cada subcuenca a partir de expresión $0.75 \cdot T_c$	50
Tabla 57: Precipitaciones medidas el día 14 de febrero de 2014	51
Tabla 58: Resumen de aplicación del método de polígonos de Thiessen en la cuenca	53
Tabla 59: Hietograma sintético de la estación La Suela	53
Tabla 60: Valores de Cota, Volumen y Caudal erogados por embalse Rio Tercero luego del evento del 14 de febrero de 2014	61
Tabla 61: Valores de CNII de cada una de las subcuencas.	62
Tabla 62: Valores de CNIIa calibrados para cada una de las subcuencas.	62
Tabla 63: Valores de "k" de Clark para cada una de las subcuencas.	63
Tabla 64: Valores de "k" de Clark calibrados para cada una de las subcuencas.	63
Tabla 65: Caudales máximos de afluentes al embalse río Tercero.....	64
Tabla 66: Caudales y cota sup. libre de puentes Sturla y Sarmiento.	74
Tabla 67: Cotas sup. libre observadas y modeladas de puentes Sturla y Sarmiento	74
Tabla 68: Alturas de pelo libre en las secciones de control para caudal máximo	74

Capítulo I



**Marco Referencial del
Trabajo**

Capítulo I: Marco Referencial del Trabajo

1.1 Introducción.

El agua es un recurso natural de vital importancia para el desarrollo humano de cualquier sociedad. Cuidar el mismo y realizar un manejo sustentable de la misma es de extrema necesidad, ya que se trata de un recurso natural renovable con capacidad de regeneración finita, lo que significa que el tiempo de regeneración es mucho mayor a los períodos de consumo que la sociedad les da a las fuentes. En los últimos tiempos se ha observado cómo se ha ido deteriorando la calidad y cantidad del recurso, transformándose en limitado si este no es cuidado adecuadamente. Esto nos lleva a tener que protegerlo, realizando un uso sustentable que permita el mejor aprovechamiento de los distintos aprovechamientos. La protección mencionada, comienza por la educación de las generaciones venideras en el cuidado del agua. Citando al ex decano de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, el Ingeniero Terzariol, en el II Taller de Estudios Hidroambientales de la Cuenca del Río Carcaraña, llevada a cabo el 19 de Octubre de 2015: *“...la sociedad se piensa que el agua es un recurso que tiene, y que puede hacerse del mismo para distintos fines, como el consumo, la generación eléctrica, el riego de campos, etc., pero no se da cuenta que el mismo no es un recurso, sino un patrimonio que tiene, y que como tal hay que cuidarlo y protegerlo...”*.

Este manejo sustentable permite afrontar las distintas amenazas hídricas que afectan a la sociedad como las sequías y períodos de excedencias de agua, preservando la continuidad del recurso. Entre los años 2014 y 2015 en la Provincia de Córdoba, se dieron períodos de abundantes lluvias que provocaron inundaciones (excedencia hídrica) en distintos puntos de la provincia, principalmente en las localidades y campos ribereños.

La resolución de la problemática es dificultosa y requiere de un complejo análisis que deben ser llevados a cabo a través de un trabajo interdisciplinario (compuesto por ingenieros, técnicos, autoridades de gestión, sociólogos, biólogos, geólogos, etc). Entre las problemáticas se encuentra que el embalse de Río Tercero (único con capacidad de regulación considerable en el sistema) es un embalse de usos múltiples, en donde cada usuario posee diferentes requerimientos de agua, que impactan sobre la operación del embalse. Esto lleva a una serie de discusiones haciendo que la problemática deba ser analizada cuidadosamente. Debido a esto, este trabajo se centrará principalmente en la generación de herramientas que permitan mejorar y optimizar el manejo del embalse de Río Tercero para la atenuación de crecidas, y a través de un análisis hidráulico determinar niveles de inundación en la localidad de Bell Ville, con el fin de servir de apoyo a las autoridades correspondientes para la toma de las medidas necesarias.

En el presente capítulo se describe el área de estudio, donde se ubican y detallan las zonas que aportan agua al sistema en estudio, teniendo en cuenta los sectores afectados por el río aguas abajo de la misma. Posteriormente se realiza una introducción a la problemática existente en la cuenca, la cual ha impulsado la realización de los estudios expuestos en el trabajo. También se presentan los estudios antecedentes sobre la base de los cuales se avanzó en el trabajo, y para finalizar se presentan los objetivos y la metodología que se siguió para llevar a cabo el estudio.

1.2 Descripción del área de estudio.

El área de estudio donde se centra este trabajo es la cuenca del río Tercero (Ctalamochita), la cual posee un área de 9580 km² (Saldaño, 2010) y es una de las cuencas de mayor explotación hidroeléctrica en la Provincia de Córdoba. Su cuenca alta (figura 1), la cual es modelada hidrológicamente en este trabajo, posee con una superficie de 3238km² (tomando como cierre el embalse de Río Tercero), y se encuentra ubicada en el centro-oeste de la Provincia de Córdoba, en las sierras de Comechingones. Esta cuenca, a la vez se divide en 6 sub-cuencas, donde los principales ríos tributarios que recolectan el agua de las mismas son el río Santa Rosa, el arroyo Amboy, el río Quillinzo, río Grande y el río La Cruz.

El río que desagua de la cuenca alta es el río Tercero (también llamado río Ctalamochita). El mismo nace en el embalse de Río Tercero y a partir del embalse Piedras Moras adquiere características de un río de llanura. El río Tercero (Ctalamochita) recorre todo el ancho de la Provincia de Córdoba de oeste a este (figura 2) (en este sector, más precisamente en la localidad de Bell Ville, se ha realizado un modelo hidráulico), y luego de confluir con el río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto) forma el río Carcarañá, que luego ingresa en territorio de la Provincia de Santa Fe para finalmente desembocar en el río Coronda en las proximidades de la localidad de Puerto Gaboto, el cual a su vez es afluente del río Paraná.



Figura 1: Ubicación de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)



Figura 2: Cuenca del río Carcarañá junto a su red hidrográfica

1.3 Problemática existente.

La cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) se encuentra regulada por un sistema de seis embalses, los cuales poseen múltiples usos (los embalses de Río Tercero, Ingeniero Casaffousth, Ingeniero Benjamín Reolín, Piedras Moras, Cerro Pelado y Arroyo Corto). El embalse de Río Tercero, el cual posee la mayor capacidad de almacenamiento (550 Hm^3 a cota de vertedero) tiene entre sus funciones atenuar crecidas, que es de vital importancia y sobre el que se centrará el presente trabajo, ya que aguas abajo del embalse se encuentran importantes localidades emplazadas en las márgenes del río, que presentan riesgos de inundación cuando los caudales por el mismo son mayores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$. A estos usos, se suma la existencia de la central nuclear de Embalse, la cual se encuentra emplazada en las costas del mismo embalse, y que posee como limitación una cota mínima para que pueda funcionar el sistema de enfriamiento de sus reactores, lo que dificulta aún más el manejo del embalse. Todos estos factores requieren de una planificación detallada para realizar una operación adecuada del mismo y para lo cual se debe contar con datos confiables y con sustento científico. Cabe destacar que actualmente, sobre la cuenca en estudio existe escasa disponibilidad de datos, lo cual hace muy difícil la toma de decisiones por parte de las autoridades.

Sumado a la problemática del manejo de embalses, se agrega que debido a los caudales erogados por el mismo en el mes de febrero de 2014 y fechas posteriores, se registraron crecidas de importancia sobre el río Tercero (Ctalamochita) (figura 3) que inundaron varias localidades ribereñas, entre las cuales se encuentra la ciudad de Bell Ville. Por ello en este trabajo se realiza una modelación hidrológica del evento registrado el día 14 de febrero de 2014. Dicha modelación permitirá obtener más información acerca del evento registrado y con el modelo calibrado se podrán realizar otras simulaciones que permitirán a los organismos de gestión tomar las decisiones correspondientes. Además se realiza una modelación hidráulica del tramo urbano del río Tercero en la localidad de Bell Ville, dicho modelo se calibró mediante el uso de datos experimentales de campo, relevados con ADCP. Al igual que el modelo hidrológico, este modelo permitirá a las autoridades de gestión simular diferentes escenarios y conocer los sectores críticos en donde se deban adoptar medidas estructurales o no estructurales.



Figura 3: Inundaciones en Ciudad de Bell Ville en febrero de 2014

1.4 Estudios antecedentes.

Se realizó una extensa búsqueda bibliográfica de información antecedente sobre la cuenca de estudio. Entre los mismos podemos mencionar el estudio de Dasso, et al (2007), quienes realizaron un trabajo donde se determina las láminas de lluvia a ingresar, en cada subcuenca utilizada por la modelación hidrológica, para predecir caudales correspondientes a distintas recurrencias, utilizados a su vez para definir niveles de interés legal. Este trabajo se centró en la cuenca del río Santa Rosa.

Por su parte, Moreyra (2008) realizó un estudio sobre las distintas características hidrogeológicas de la cuenca del río Tercero (Ctalamochita) para correlacionar la calidad del agua en el río con las características físico-químicas de la cuenca. Con el mismo enfoque se encuentran los estudios de Saldaño (2010), quien presentó una contribución al desarrollo de un modelo de calidad de agua para el río Ctalamochita, para lo cual requirió el procesamiento de datos de campañas de muestreo de calidad del agua del río y de los efluentes, como así también de los aforos, que datan desde el año 2004 al 2010. Se plantearon escenarios de modelación variando caudales del río y/o concentraciones de efluentes, a fin de determinar el caudal mínimo aceptable, comparando los resultados obtenidos en la simulación con niveles guía de acuerdo al uso esperado del recurso.

También se realizaron estudios relacionados a la cuantificación de los caudales ecológicos en el río Tercero (Ctalamochita) (Bedogni 2011), donde los mismos se centraron en la determinación de los caudales ecológicos para que se pueda conservar la biota en el curso del río, sin que esto signifique un riesgo para su supervivencia. Ese estudio abarcó desde recopilación y verificación de datos existentes, hasta la generación de nuevos datos mediante aforos de secciones para la simulación del río.

Además, existe un estudio sobre la cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en el sistema fluvial del río Carcaraña (Díaz Lozada, 2014), en el cual se llevó a cabo un estudio integral de la cuenca con el fin de generar información necesaria para lograr un mejor manejo del recurso hídrico y así tener un sustento para llevar a cabo distintas medidas. Otro trabajo que trata la misma problemática es el llevado a cabo por Barchiesi (2014) en su trabajo de práctica supervisada.

Además de toda la información bibliográfica existente, actualmente, la Red Hidrometeorológica Nacional de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación cuenta con información pluviométrica de paso diario obtenida de un total de seis pluviómetros (Cerro Blanco (32°07'60.00"S ; 64°55'00.00"O), El Manzano (32°22'00.00"S ; 64°53'00.00"O), El

Durazno (32°13'60.00"S ; 64°46'60.00"O), Lutti (32°17'60.00"S ; 64°44'00.00"O), Pampichuela (32°07'60.00"S ; 64°48'60.00"O) y Yacanto (32°06'00.00"S ; 64°45'00.00"O) e información de caudales sobre el río Grande (tributario del río Tercero o Ctlamochita) en el paraje de Ume Pay, ubicado aguas arriba de las explotaciones hidroeléctricas del complejo río Grande. Los datos pluviométricos y de caudales proveen información relevante para el manejo de los embalses del sistema.

A pesar de todos los estudios antecedentes, al momento de realizar este trabajo, no se ha encontrado bibliografía de los últimos 20 años donde se realicen modelaciones hidrológicas en la cuenca alta abarcada en forma integral y donde se realice un modelo hidráulico del río Ctlamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville. Por lo que el trabajo desarrollado en esta práctica es un aporte más al conocimiento del sistema de río Tercero.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivos generales

El objetivo del presente trabajo es la **“modelación hidrológica e hidráulica del comportamiento de la cuenca del río Ctlamochita durante el evento extraordinario de febrero-marzo de 2014”**. La modelación hidrológica permitirá determinar la escorrentía superficial en las diferentes subcuencas debido al evento extraordinario del 14 de febrero de 2014 y así tener un sustento para mejorar el manejo del embalse de Río Tercero, ya que se trata del principal regulador del sistema.

La modelación hidráulica consiste en la generación de un modelo hidráulico del río en la localidad de Bell Ville. Dicha modelación consistió en obtener el mapa de inundación de la localidad para el pico de crecida registrado el 05/03/2014. Los resultados obtenidos servirán de sustento para adoptar medidas, tanto estructurales, como la refacción de los elementos de erogación de la presa para garantizar un caudal de salida que evite inundaciones (como las producidas por el evento extraordinario en estudio en las localidades que se encuentran sobre los cauces del río Tercero o Ctlamochita), o la construcción de defensas para evitar desbordes del río en zonas urbanas; y al mismo tiempo que nos permita tomar medidas no estructurales, orientadas principalmente a la gestión del recurso como posibles cotas de espera. Además, mediante el modelo calibrado, los organismos de gestión, pueden evaluar diferentes condiciones y servir de apoyo para la toma de decisiones.

1.5.2 Objetivos específicos

Con el fin de buscar cumplir con los objetivos generales, se proponen los siguientes objetivos específicos: a)- Búsqueda de antecedentes de estudios realizados sobre la cuenca, y la definición de la problemática existente que lleva a la necesidad de realizar el presente trabajo. b)- Caracterización de la cuenca en estudio para tener un mejor conocimiento de los distintos parámetros que influyen en el escurrimiento y así lograr un mejor entendimiento de la misma. c)- Elaboración de un modelo hidrológico que represente correctamente la cuenca en estudio y poder determinar la escorrentía superficial que se produce bajo condiciones específicas de la misma. d)- Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014 utilizando las condiciones existentes en la cuenca durante el evento. d)- Elaboración y calibración de un modelo hidráulico de un tramo de río en la localidad de Bell Ville, para poder reconstruir el mapa de inundaciones de la ciudad durante el mes de marzo. e)- Resultados obtenidos de la calibración del modelo hidráulico para la

reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de febrero y marzo de 2014 para otorgar a las autoridades correspondientes información complementaria para la toma de decisiones al momento de adoptar alguna medida. e)- Conclusiones y recomendaciones técnicas sobre el trabajo efectuado y conclusiones personales acerca de la práctica supervisada.

1.6 Metodología.

Para el desarrollo del presente trabajo, primero se comenzó definiendo la problemática, la cual derivó en una recopilación de información antecedente sobre la cuenca y el sistema hidrológico existente, consultando distintas bibliografías referidas a la temática de esta práctica. Posteriormente con la problemática definida y los antecedentes existentes, se definieron los objetivos de esta práctica supervisada. Todo este trabajo se encuentra condensado en el capítulo 1. Luego, en el capítulo 2, se procedió a la caracterización de la cuenca en estudio. En dicho capítulo, se describe la visita a campo realizada con el fin de hacer un reconocimiento de la cuenca. Posteriormente, se procedió a delimitar la cuenca de estudio y sus correspondientes subcuencas mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando un Modelo Digital del Terreno (MDT). Una vez efectuada dicha tarea, se caracterizó cada subcuenca mediante el procesamiento de las bandas espectrales de imágenes satelitales Landsat 8, lo que permitió obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Mediante dicho procesamiento se pudo conocer la distribución de la cobertura vegetal existente y posteriormente correlacionar ese valor de NDVI a un valor de CN (Curva Número del SCS). También en este capítulo determinó la red de escurrimiento del sistema hidrológico y el tiempo de concentración para cada una de las subcuencas.

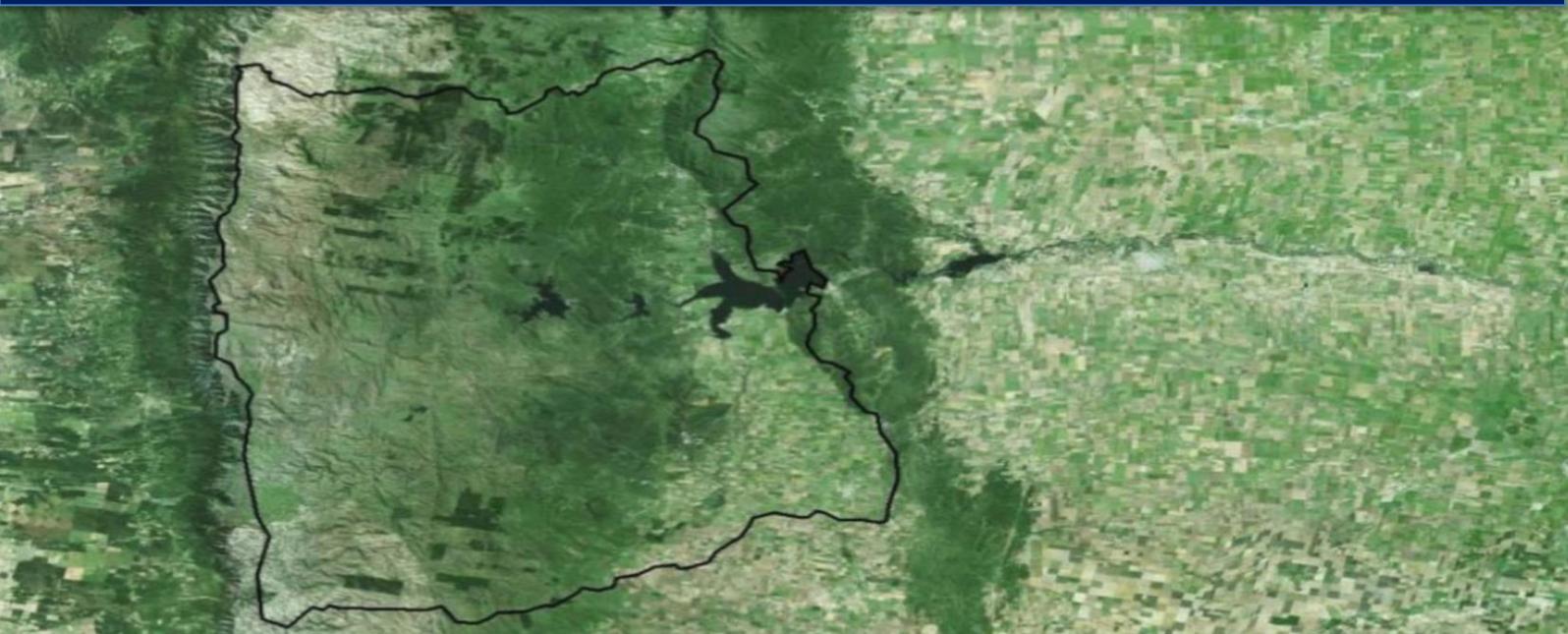
Una vez caracterizadas y delimitadas las cuencas, en el capítulo 3 se realiza la elaboración de un modelo hidrológico, para lo cual se determinaron los parámetros que fueron utilizados en el mismo, como por ejemplo el valor de la Curva Número (CN) del SCS (Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos) y la determinación del coeficiente “k” de Clark. También se procedió a la obtención de la precipitación correspondiente al evento extraordinario del 14 de febrero de 2014 a partir de datos de distintas estaciones de medición de la Subsecretaría de Recursos Hídricos y utilizando polígonos de Thiessen, para así realizar la distribución espacial y temporal de la lluvia. Luego, en el capítulo 4, se realiza la calibración del modelo hidrológico utilizando las condiciones existentes en la cuenca durante el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014 y se exponen los resultados obtenidos de la modelación hidrológica para el mismo, donde se detallan los hidrogramas de ingreso y de egreso al embalse de Río Tercero.

En el capítulo 5, se realizó la elaboración y calibración del modelo hidráulico de un tramo del río Tercero (Ctalamochita) en la ciudad de Bell Ville, utilizando el modelo HEC-RAS. En este punto, se determinaron los parámetros del “n” de Manning del cauce, y las áreas de flujo inefectivo.

A continuación en el capítulo 6, se muestran los resultados obtenidos con el modelo hidráulico calibrado del mapa de inundación para el caudal del evento del 05 de marzo de 2014, con el cual se podrá tomar las decisiones para la construcción de obras que eviten desbordes como sucedieron en dicha ocasión.

Por último, en el capítulo 7 se exponen las conclusiones del trabajo realizado, exponiendo en el mismo una serie de recomendaciones y sugerencias.

Capítulo II



**Caracterización de la
Cuenca en Estudio**

Capítulo II: Caracterización de la Cuenca en Estudio

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se realiza una caracterización de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita), ya que la misma es la base fundamental para poder realizar el estudio hidrológico en el cual se basa el presente trabajo. Primero, se describe la visita a campo realizada en el mes de marzo de 2015. En dicha campaña se pudieron conocer las características físicas de la cuenca como así también el uso del suelo y la cobertura vegetal. Además se aforaron los caudales escurridos en los distintos tributarios al embalse de Río Tercero.

Posteriormente, se emplearon diferentes herramientas informáticas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la obtención del Modelo Digital de Terreno de la cuenca (MDT). Dicho modelo fue obtenido a partir de imágenes SRTM. Mediante el procesamiento del Modelo Digital del Terreno (MDT), se delimitaron las cuencas de los tributarios y las principales subcuencas, como así también la red de escurrimiento. Finalmente se presentan los mapas de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) de la cuenca, obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat 8, los cuales fueron utilizados para determinar la cobertura vegetal del suelo.

2.2 Visita de reconocimiento a campo.

Con el objetivo de tener un mejor conocimiento de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita), el día 14 de marzo de 2015 se realizó una visita a campo, en la cual se observaron las diferentes coberturas vegetales que componen el área de la misma y se tomó conocimiento del uso del suelo (figuras 4 y 5), como también de las pendientes de los cauces y las divisorias de aguas de las subcuencas. Además, se conocieron los principales tributarios al embalse de Río Tercero (ríos Santa Rosa, Grande, Quillinzo y La Cruz) y se aforaron los mismos, mediante el uso de un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) “YSI/SonTek River Surveyour S5”, en una condición donde el flujo base se encontraba alto debido a las lluvias registradas en semanas anteriores (figura 6). El ADCP permite, además de determinar los caudales superficiales escurridos, caracterizar hidrodinámicamente la sección.



Figura 4: Uso rural en el sector sur de la cuenca



Figura 5: Vegetación existente en el sector oeste de la cuenca, Villa Yacanto



Figura 6: Medición ADCP en el río Santa Rosa el día 04/03/2015

La localización de los distintos puntos de aforo que fueron relevados el día de la visita a campo pueden observarse en la figura 7, y los caudales aforados son presentados en la tabla 1.

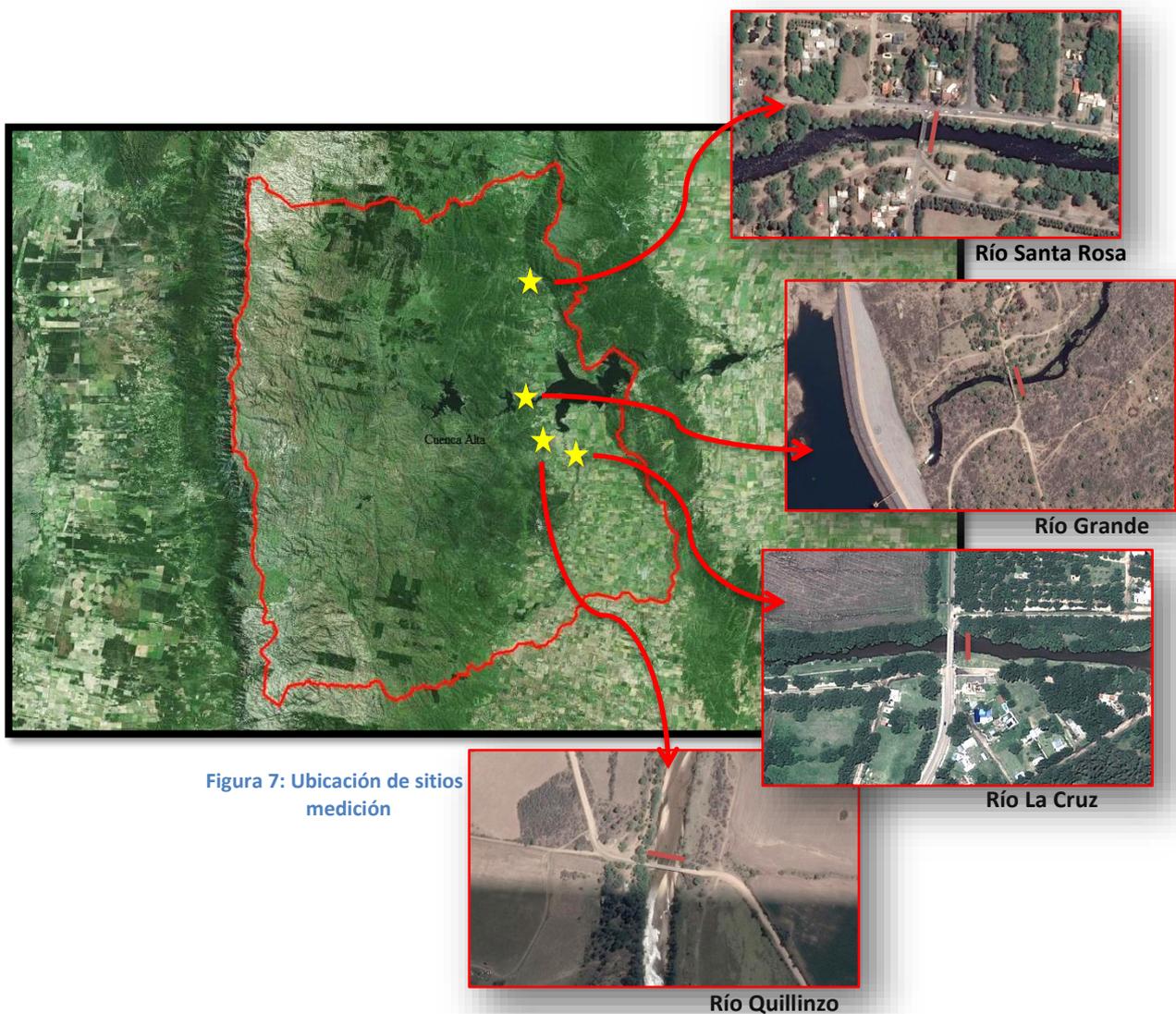


Figura 7: Ubicación de sitios medición

Tabla 1: Caudales aforados durante la campaña del día 15 de marzo de 2015

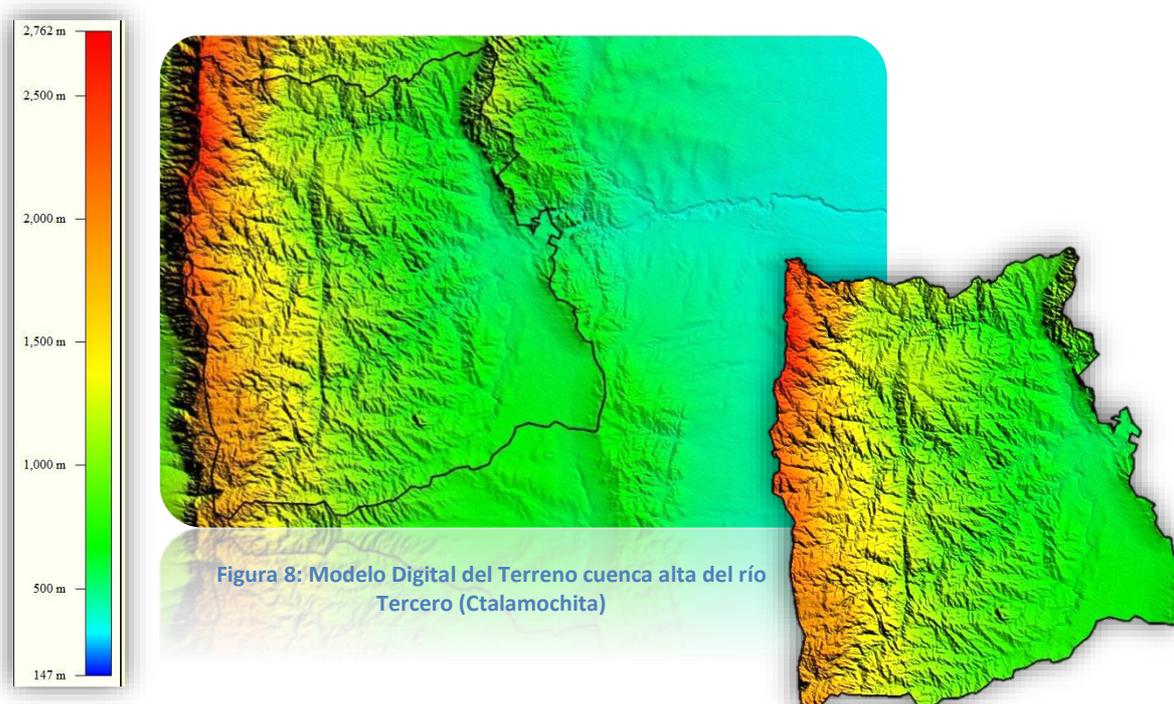
Río	Sección	Caudal (m ³ /s)
Santa Rosa	Puente Negro – Sta. Rosa de Calamuchita	39.34
Grande	Aguas abajo presa Arroyo Corto	45.00
Quillinzo	Puente Ruta 23	53.22
La cruz	Puente de ingreso a la localidad de La Cruz	33.54

2.3 Herramientas informáticas utilizadas para caracterizar la cuenca.

Para poder proceder en el estudio y lograr una caracterización adecuada de la cuenca, se debieron utilizar herramientas informáticas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como es el caso de los programas Global Mapper y ArcGis, para el procesamiento de información obtenida de datos SRTM e imágenes Landsat 8. Dichos archivos fueron obtenidos de las bases de datos de libre acceso que se encuentran la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

2.3.1 Modelo digital del terreno SRTM.

Para conocer la topografía de la cuenca, se empleó un Modelo Digital del Terreno (MDT). Este se construye a través de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Uno de los Modelos Digitales de Terreno mayormente utilizado a nivel mundial es el SRTM, cuyas siglas significan en español Misión Topográfica de Radar Shuttle. El mismo fue creado con una resolución de 30mx30m en los Estados Unidos y de 90m x 90m para el resto del mundo (NASA, 2000), entre las latitudes 56° S y 60° N. Mediante el uso de la información proveniente del modelo digital del terreno, se delimitó la cuenca de estudio (figura 8) y las diferentes subcuencas que pertenecen a la misma, además se determinaron la red de escurrimiento y las pendientes de los cauces.



Mediante el uso del MDT se pudo generar las curvas de nivel (figura 9), para tener una percepción más simple de las elevaciones que caracterizan a la cuenca:

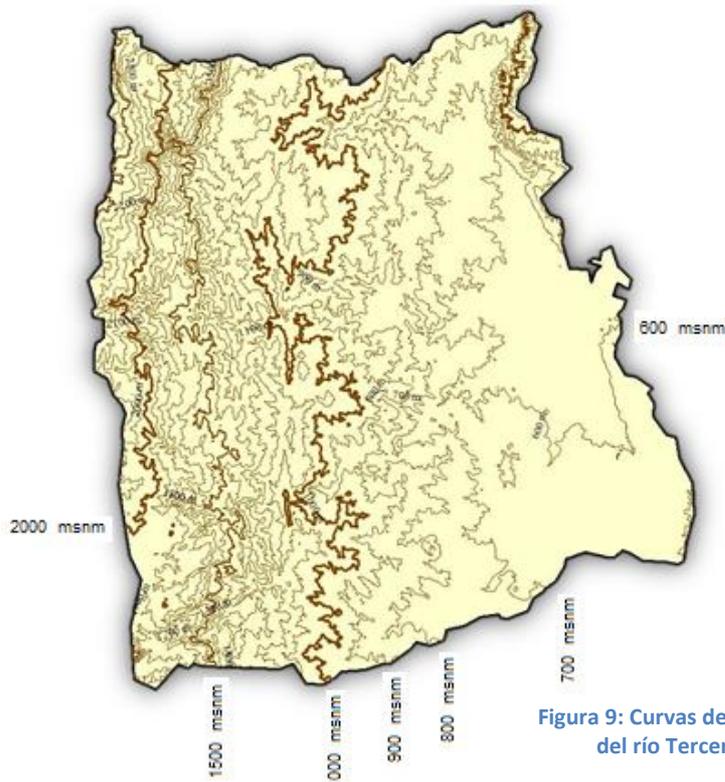


Figura 9: Curvas de nivel de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)

2.3.2 Índice NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)

Para caracterizar la cobertura vegetal del suelo que compone la cuenca en estudio, se realizó un mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por las siglas en inglés), que es utilizado para estimar la extensión y tipo de vegetación en las distintas zonas de estudio. El mismo se obtiene a través de combinaciones de las bandas espectrales registradas por satélites de teledetección, teniendo como objetivo realzar la vegetación en función de la respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos que componen el suelo (Alonso, 2015). Este índice se calcula a partir de una operación algebraica entre las distintas bandas espectrales utilizando la ecuación 1, obteniendo como resultado una nueva imagen en donde los valores de cada uno de los píxeles poseen un valor que varía entre -1 y 1, pudiendo así ser relacionados con cierta cobertura vegetal.

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

- B4: Banda 4 (Rojo) → 0.63-0.68μm
- B5: Banda 5 (IRCercano) → 0.845-0.885μm

Las variables Rojo e IRCercano están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano.

En el presente estudio se realizó el procesamiento con imágenes obtenidas del Landsat 8 del día 12 de octubre de 2014, con el programa comercial de Sistema de Información Geométrica (SIG) ArcGIS. Se seleccionó esta imagen, en virtud de los datos existentes para calibrar el modelo y debido a que la misma abarcaba toda la cuenca y se encontraba despejada.

2.4 Delimitación de la cuenca y subcuencas de estudio.

Mediante el procesamiento de la información obtenida del Modelo Digital de Terreno (MDT), se delimitó la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) con sus correspondientes subcuencas.

En la figura 10 se muestra la cuenca delimitada cuyo punto de cierre es el embalse de Río Tercero. El área de aporte de la cuenca a este punto de cierre es de 3238 km².



Figura 10: Delimitación de la cuenca alta del río Ctalamochita

En la figura 11, se muestran las cuencas correspondientes a cada uno de los principales tributarios del embalse de Río Tercero, los cuales son: (a) arroyo Amboy, (b) río Grande, (c) río La Cruz, (d) río Quillínzo, (e) río Santa Rosa y (f) una cuenca rural de importante extensión (aquí llamada cuenca Planicie debido a que la misma se encuentra en una parte llana dentro de la cuenca). A su vez, estas cuencas, fueron subdivididas en la principales subcuencas de cada uno de los tributarios (figura 12) para construir un modelo hidrológico. En la tabla 2 se muestra las superficies obtenidas de cada una de las subcuencas y el área total de cada cuenca.



Figura 11: Cuencas correspondientes a los tributarios del embalse de Río Tercero



Figura 12: Detalle de división en subcuencas

Tabla 2: Áreas de subcuencas de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	
Santa Rosa	Santa Rosa Sub 1	120.62	705.59
	Santa Rosa Sub 2	96.01	
	Santa Rosa Sub 3	202.00	
	Santa Rosa Sub 4	110.21	
	Santa Rosa Sub 5	176.75	
Amboy	Arroyo Amboy	102.25	102.25
Río Grande	Grande Sub 1	215.30	909.40
	Grande Sub 2	206.39	
	Grande Sub 3	167.46	
	Grande Sub 4	111.59	
	Grande Sub 5	79.66	
	Grande Sub 6	106.76	
	Grande Sub 7	22.24	
Quillinzo	Quillinzo Sub1	143.63	616.39
	Quillinzo Sub2	176.63	
	Quillinzo Sub3	296.13	
La Cruz	La Cruz Sub 1	181.17	521.89
	La Cruz Sub 2	96.00	
	La Cruz Sub 3	149.84	
	La Cruz Sub 4	94.88	
Planicie	Planicie Sub 1	223.42	273.36
	Planicie Sub 2	49.94	

2.5 Delimitación de la red de escurrimiento.

Del procesamiento del Modelo Digital del Terreno (MDT) puede obtenerse, además, la red de escurrimiento de la cuenca. Dicha red fue posteriormente corregida manualmente, en base a observaciones de imágenes de Google Earth, debido a la existencia de fallas en la detección de algunos cursos.

Toda la red presenta un desarrollo de oeste a este, cuyas nacientes se encuentran en el cordón montañoso de las Sierras Grandes de Córdoba, a más de 2.000 msnm. En la figura 13 se muestra la imagen con la red de escurrimiento de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).

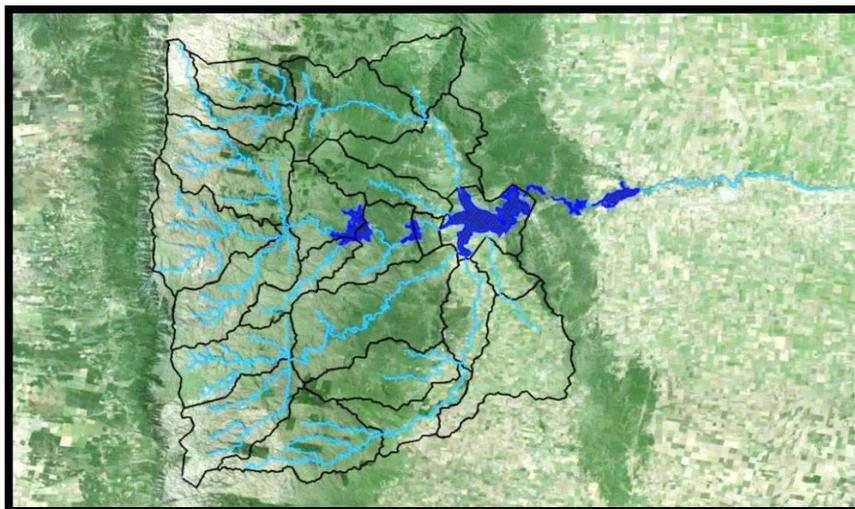


Figura 13: Red de escurrimiento de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)

Mediante la red obtenida, se determinaron los cauces de cada una de las subcuencas, como así también las longitudes de los mismos y sus pendientes. Dichos resultados son mostrados en la tabla 3.

Tabla 3: Datos de las subcuencas: altitudes, longitud de cauce y pendiente

Cuenca	Subcuenca	Altitud Máxima (m)	Altitud Mínima (m)	Longitud del cauce (m)	Pendiente (%)
Santa Rosa	Santa Rosa Sub 1	2397.00	929.52	40570	3.62
	Santa Rosa Sub 2	1782.49	929.52	18101	4.71
	Santa Rosa Sub 3	929.52	604.79	23610	1.38
	Santa Rosa Sub 4	663.64	604.79	7479	0.79
	Santa Rosa Sub 5	604.79	531.52	16024	0.46
Amboy	Arroyo Amboy	735.21	534.66	17541	1.14
Río Grande	Grande Sub 1	2370.50	838.60	39381	3.89
	Grande Sub 2	2138.64	930.14	33895	3.57
	Grande Sub 3	1933.94	838.60	32558	3.36
	Grande Sub 4	838.60	767.68	14908	0.48
	Grande Sub 5	1304.66	767.68	26800	2.00
	Grande Sub 6	734.28	568.23	11860	1.40
Quillinzo	Quillinzo Sub1	1955.23	987.89	28129	3.44
	Quillinzo Sub2	1634.57	987.89	29071	2.22
	Quillinzo Sub3	987.89	532.18	58866	0.77
La Cruz	La Cruz Sub 1	1318.50	748.11	35889	1.59
	La Cruz Sub 2	748.11	623.43	22088	0.56
	La Cruz Sub 3	730.37	623.43	15593	0.69
	La Cruz Sub 4	623.43	536.16	20113	0.43
Planicie	Planicie Sub 1	604.66	581.90	9512	0.24
	Planicie Sub 2	581.90	537.80	10983	0.40

2.6 Determinación del mapa de NDVI

A través del uso y procesamiento de los datos de las imágenes Landsat 8, se generaron los distintos mapas de NDVI para la cuenca en estudio. Posteriormente se relacionó el valor de NDVI con la cobertura vegetal existente. Por cuestiones de simplicidad en el procesamiento de los datos con el programa ARCGIS, se generó una nueva escala que varía entre 0 y 100, en donde cada valor está relacionado a un índice NDVI. Dicha escala será nombrada NDVI reclasificado. En la tabla 4 se muestra los valores de NDVI junto a los valores de NDVI reclasificado. Se observa en la tabla que el rango de valores de NDVI entre 0 y -1 se asignó como agua, dado que entre estos valores lo único que se detectó en el procesamiento fueron los espejos de agua.

Tabla 4: Correspondencia entre valores de NDVI y vegetación existente

Tabla de correlación entre NDVI y CN (Grupo Hidrológico B)		
Característica	Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificada
Bosques Cubierta buena	1.00 - 0.30	1 al 35
Áreas abiertas Condiciones óptimas	0.30 - 0.22	36 al 39
Pastizales Condiciones Óptimas	0.22 - 0.16	40 al 42
Tierra cultivada con tratamientos de conservación	0.16 - 0.14	43
Pastizales Condiciones Pobres	0.14 - 0.12	44
Tierra cultivada sin tratamientos de conservación	0.12 - 0.10	45
Residencial (65% impermeable)	0.10 - 0.00	46 al 50
Agua	0.00 - (-1.00)	

A continuación se muestra los mapas obtenidos para cada una de las cuencas de los principales tributarios al embalse de río Tercero (Ctalamochita), que conforman la cuenca alta de ese río (figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19). Además, junto a cada figura se adjunta una tabla con los valores de NDVI reclasificado, NDVI y la cantidad de pixeles que pertenecen a cada clasificación (en ArcGIS se conocen como COUNTS) (tablas 5, 6, 7, 8, 9 y 10).

Cuenca Santa Rosa

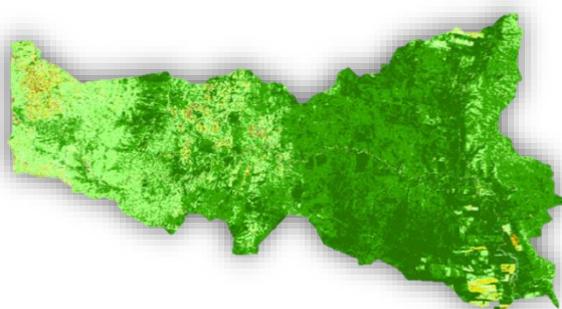


Figura 15: Mapa NDVI cuenca Santa Rosa

Cuenca Amboy

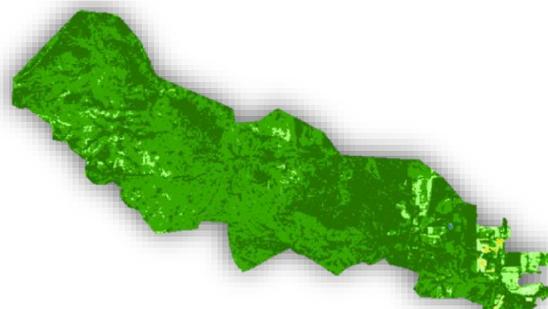


Figura 14: Mapa NDVI cuenca Amboy

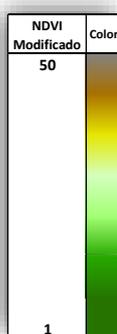


Tabla 6: Valores de NDVI de la cuenca Santa Rosa y cantidad de Counts

Cuenca Santa Rosa		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	236300
0.30 - 0.22	36 al 39	317759
0.22 - 0.16	40 al 42	165819
0.16 - 0.14	43	30674
0.14 - 0.12	44	19659
0.12 - 0.10	45	6213
0.10 - 0.00	46 al 50	2516
Totales		778940

Tabla 5: Valores de NDVI de la cuenca Amboy y cantidad de Counts

Cuenca Amboy		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	49807
0.30 - 0.22	36 al 39	55440
0.22 - 0.16	40 al 42	4816
0.16 - 0.14	43	868
0.14 - 0.12	44	1939
0.12 - 0.10	45	476
0.10 - 0.00	46 al 50	8
Totales		113354

Cuenca Río Grande

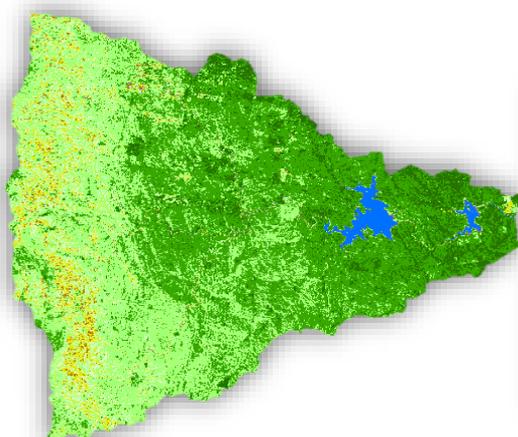


Figura 17: Mapa NDVI cuenca Río Grande

Cuenca Quillinzo

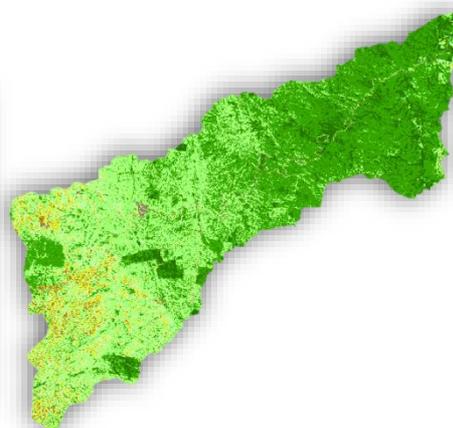


Figura 16: Mapa NDVI cuenca Quillinzo

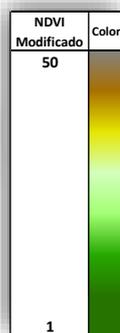


Tabla 8: Valores de NDVI de la cuenca Río Grande y cantidad de Counts

Cuenca Río Grande		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	95390
0.30 - 0.22	36 al 39	392432
0.22 - 0.16	40 al 42	346379
0.16 - 0.14	43	93229
0.14 - 0.12	44	50241
0.12 - 0.10	45	10355
0.10 - 0.00	46 al 50	4662
Totales		992688

Tabla 7: Valores de NDVI de la cuenca Quillinzo y cantidad de Counts

Cuenca Quillinzo		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	61186
0.30 - 0.22	36 al 39	280332
0.22 - 0.16	40 al 42	238163
0.16 - 0.14	43	54845
0.14 - 0.12	44	33324
0.12 - 0.10	45	10712
0.10 - 0.00	46 al 50	4929
Totales		683491

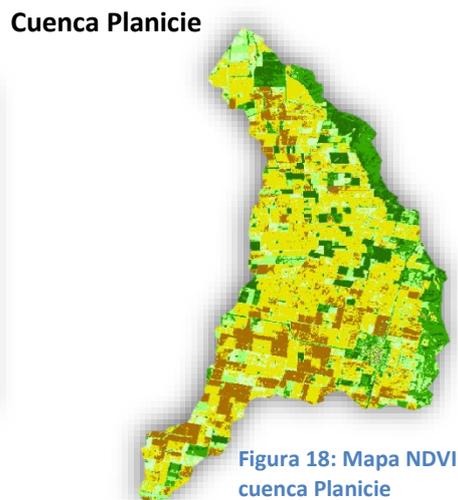
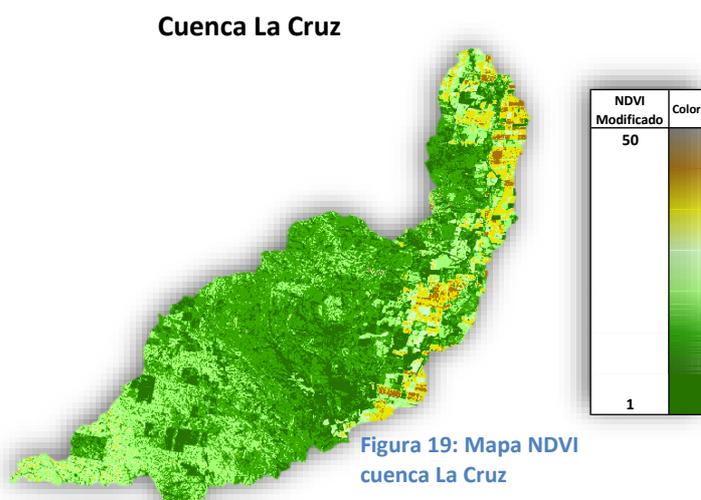


Tabla 10: Valores de NDVI de la cuenca La Cruz y cantidad de Counts

Cuenca La Cruz		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	117163
0.30 - 0.22	36 al 39	252998
0.22 - 0.16	40 al 42	131635
0.16 - 0.14	43	28436
0.14 - 0.12	44	37390
0.12 - 0.10	45	10565
0.10 - 0.00	46 al 50	474
Totales		578661

Tabla 9: Valores de NDVI de la cuenca Planicie y cantidad de Counts

Cuenca Planicie		
Valor NDVI	Valor NDVI Reclasificado	Counts ArcGIS
1.00 - 0.30	1 al 35	28853
0.30 - 0.22	36 al 39	36241
0.22 - 0.16	40 al 42	30146
0.16 - 0.14	43	32195
0.14 - 0.12	44	127613
0.12 - 0.10	45	47557
0.10 - 0.00	46 al 50	432
Totales		303037

2.7 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración de una cuenca se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la misma estén aportando agua de escorrentía al punto de cierre. El mismo, está determinado por el tiempo que tarda en llegar el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado a la salida de la cuenca.

Para determinar el tiempo de concentración (T_c), existen tres alternativas: (a) estimar el tiempo de concentración a partir de datos observados, (b) mediante fórmulas empíricas y (c) mediante el enfoque físico cinemático (Freiria, 2014).

En este apartado, se procederá a estimar el tiempo de concentración mediante el uso de fórmulas empíricas debido a la falta de información hidrológica suficiente en la cuenca. Se calculó el tiempo de concentración utilizando varias ecuaciones reportadas en la literatura (Bertoni, 2000; Chow, 1994; notas de clases de Hidrología Urbana del profesor Weber, 2015). Dichas ecuaciones fueron seleccionadas en función de que fueron calibradas en cuencas de características similares a la de estudio. Las mismas se exponen a continuación.

Finalmente se realizó un promedio entre el Método Racional Generalizado, y el método del SCS, ya que son las que arrojan un resultado razonable según las características de las cuencas en estudio usando como parámetro de comparación el tiempo obtenido a partir de la velocidad media de ríos de montaña en crecida (3 a 4 m/s) dividido la longitud del cauce. A continuación se exponen las fórmulas utilizadas:

- **SCS**

$$t_c = \left(\frac{0.87L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo: - t_c : tiempo de concentración (h)

- L: Longitud del cauce principal (km)

-H: desnivel del cauce (m)

- **Ecuación de retardo SCS**

$$t_c = 3.42L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.75} S^{-0.5} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo: - t_c : tiempo de concentración (min)

- L: Longitud del cauce principal (km)

-S: pendiente del cauce (m/km)

- CN: número de curva del SCS

-Cuencas rurales de $A < 8 \text{ km}^2$

- **Bransby-Williams**

$$t_c = \frac{58L}{A^{0.1}S^{0.2}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo: - t_c : tiempo de concentración (min)

- L: Longitud del cauce principal (km)

-S: pendiente del cauce (m/km)

-A: área de la cuenca (km^2)

- **Dooge**

$$t_c = 21.88A^{0.41}S^{-0.17} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo: - t_c : tiempo de concentración (min)

- A: Área de la cuenca (km^2)

- S: pendiente media del cauce (m/km)

- Cuencas rurales de $140 \text{ km}^2 < A < 930 \text{ km}^2$

- **Método Racional Generalizado**

$$t_c = \frac{60kL}{H^{0.3}} \text{ (Ecuación 6)}$$

Siendo: - t_c : tiempo de concentración (min)

- A: Área de la cuenca (km²)

- H: diferencia de nivel de la cuenca (m)

- k: rugosidad relativa del cauce (se adopta igual a 1)

A continuación se exponen los resultados para cada una de las subcuencas que componen la cuenca alta del Río Tercero (Ctalamochita):

- **Cuenca Santa Rosa**

En las tablas 11, 12, 13, 14 y 15 se muestran los resultados del tiempo concentración para cada una de las subcuencas del río Santa Rosa. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

Tabla 11: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 1

Santa Rosa Sub 1			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	710.92	260.22	4.34
Método Racional Generalizado	273.14		
Ecuación de Retardo SCS	1329.52		
SCS	247.29		
Dooge	88.46		

Tabla 12: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 2

Santa Rosa Sub 2			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	307.79	131.69	2.19
Método Racional Generalizado	143.41		
Ecuación de Retardo SCS	630.53		
SCS	119.98		
Dooge	84.27		

Tabla 13: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 3

Santa Rosa Sub 3			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	476.76	243.21	4.05
Método Racional Generalizado	249.91		
Ecuación de Retardo SCS	1536.95		
SCS	236.51		
Dooge	92.72		

Tabla 14: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 4

Santa Rosa Sub 4			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	179.42	106.31	1.77
Método Racional Generalizado	132.15		
Ecuación de Retardo SCS	827.69		
SCS	121.00		
Dooge	65.78		

En el caso de la subcuenca Santa Rosa Sub 4, se consideró el método de Dooge (tabla 14) ya que la ecuación encuadraba dentro de los parámetros a tener en cuenta.

Tabla 15: Tiempo de concentración Santa Rosa Subcuenca 5

Santa Rosa Sub 5			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	409.43	266.64	4.44
Método Racional Generalizado	265.12		
Ecuación de Retardo SCS	1995.29		
SCS	268.15		
Dooge	72.29		

- Cuenca Amboy

En la tabla 16 se muestran los resultados del tiempo concentración para la cuenca del río Amboy. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

Tabla 16: Tiempo de concentración Amboy

Amboy			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	393.44	208.29	3.47
Método Racional Generalizado	214.56		
Ecuación de Retardo SCS	1355.95		
SCS	202.02		
Dooge	67.97		

- Cuenca Río Grande

En las tablas 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23 se muestran los resultados del tiempo concentración para cada una de las subcuencas del río Grande. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

Tabla 17: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 1

Grande Sub 1			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	641.83	248.38	4.14
Método Racional Generalizado	261.74		
Ecuación de Retardo SCS	1264.73		
SCS	235.02		
Dooge	113.58		

Tabla 18: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 2

Grande Sub 2			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	564.51	229.21	3.82
Método Racional Generalizado	241.89		
Ecuación de Retardo SCS	1105.68		
SCS	216.52		
Dooge	109.99		

Tabla 19: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 3

Grande Sub 3			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	560.17	226.98	3.78
Método Racional Generalizado	239.30		
Ecuación de Retardo SCS	1151.67		
SCS	214.66		
Dooge	99.96		

Tabla 20: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 4

Grande Sub 4			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	395.02	249.45	4.16
Método Racional Generalizado	249.08		
Ecuación de Retardo SCS	1775.23		
SCS	249.82		
Dooge	60.69		

Tabla 21: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 5

Grande Sub 5			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	550.90	234.77	3.91
Método Racional Generalizado	243.95		
Ecuación de Retardo SCS	1368.99		
SCS	225.59		
Dooge	67.50		

Tabla 22: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 6

Grande Sub 6			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	254.36	145.88	2.43
Método Racional Generalizado	153.52		
Ecuación de Retardo SCS	881.46		
SCS	138.24		
Dooge	71.61		

Tabla 23: Tiempo de concentración Grande Subcuenca 7

Grande Sub 7			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	144.74	98.30	1.64
Método Racional Generalizado	103.52		
Ecuación de Retardo SCS	623.74		
SCS	93.08		
Dooge	33.47		

- Cuenca Quillinzo

En las tablas 24, 25 y 26 se muestran los resultados del tiempo concentración para cada una de las subcuencas del río Quillinzo. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

Tabla 24: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 1

Quillinzo Sub 1			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	489.30	202.40	3.37
Método Racional Generalizado	214.60		
Ecuación de Retardo SCS	996.94		
SCS	190.19		
Dooge	94.21		

Tabla 25: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 2

Quillinzo Sub 2			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	540.43	240.48	4.01
Método Racional Generalizado	250.27		
Ecuación de Retardo SCS	1237.21		
SCS	230.70		
Dooge	95.23		

Tabla 26: Tiempo de concentración Quillinzo Subcuenca 3

Quillinzo Sub3			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	1283.45	579.58	9.66
Método Racional Generalizado	562.87		
Ecuación de Retardo SCS	4175.06		
SCS	596.30		
Dooge	98.37		

- Cuenca La Cruz

En las tablas 27, 28, 29 y 30 se muestran los resultados del tiempo concentración para cada una de las subcuencas del río La Cruz. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

Tabla 27: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 1

La Cruz Sub 1			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	711.77	314.82	5.25
Método Racional Generalizado	320.82		
Ecuación de Retardo SCS	1940.71		
SCS	308.83		
Dooge	90.88		

Tabla 28: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 2

La Cruz Sub 2			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	574.15	314.08	5.23
Método Racional Generalizado	311.58		
Ecuación de Retardo SCS	2127.61		
SCS	316.58		
Dooge	58.74		

Tabla 29: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 3

La Cruz Sub 3			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	372.86	227.48	3.79
Método Racional Generalizado	230.32		
Ecuación de Retardo SCS	1528.10		
SCS	224.63		
Dooge	72.88		

Tabla 30: Tiempo de concentración La Cruz Subcuenca 4

La Cruz Sub 4			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	551.72	320.87	5.35
Método Racional Generalizado	315.78		
Ecuación de Retardo SCS	2070.79		
SCS	325.96		
Dooge	55.90		

- Cuenca Planicie

En las tablas 31 y 32 se muestran los resultados del tiempo concentración para cada una de las subcuencas de la cuenca Planicie. Se marca en naranja los valores que serán utilizados para promediar, ya que son los que mejor se adecuan en base a la experiencia adquirida por el grupo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la crecida.

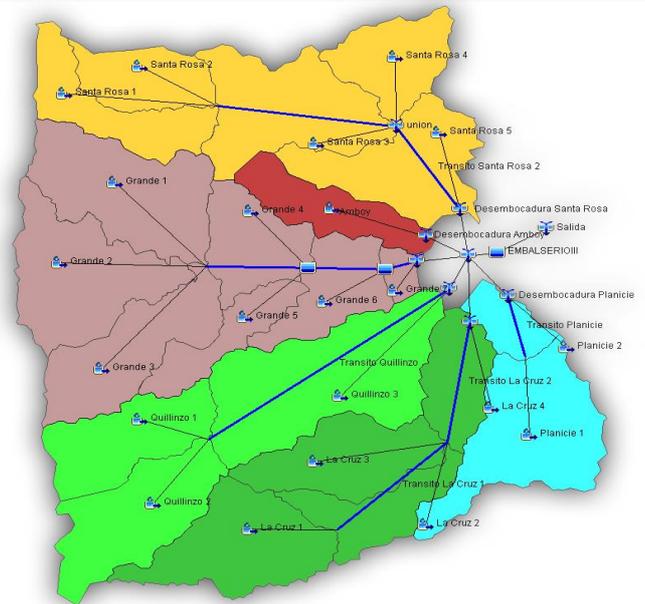
Tabla 31: Tiempo de concentración Planicie Subcuenca 1

Planicie Sub 1			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	269.78	226.89	3.78
Método Racional Generalizado	223.50		
Ecuación de Retardo SCS	1263.76		
SCS	230.28		
Dooge	71.78		

Tabla 32: Tiempo de concentración Planicie Subcuenca 2

Planicie Sub 2			
Tiempo de concentración			
Método	Valor [min]	Promedio [min]	Promedio [hr]
Bransby-Williams	326.26	211.19	3.52
Método Racional Generalizado	211.61		
Ecuación de Retardo SCS	1165.69		
SCS	210.76		
Dooge	42.41		

Capítulo III



Elaboración del Modelo
Hidrológico

Capítulo III: Elaboración del Modelo Hidrológico

3.1 Introducción.

Para determinar los caudales escurridos en cada uno de los tributarios del embalse de Río Tercero para el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014, se confecciono un modelo hidrológico de la cuenca en estudio. Para elaborar el modelo, se necesita determinar diferentes parámetros hidrológicos, por ejemplo el valor de CN (para las distintas condiciones de humedad antecedente) y el valor de “k” de Clark. La obtención de dichos parámetros se describe en el presente capítulo.

Posteriormente, se describe el procedimiento llevado a cabo para obtener la lluvia correspondiente al evento extraordinario en estudio, teniendo en cuenta la distribución temporal y espacial de su lámina. Finalmente, se describirá el modelo hidrológico HEC-HMS, que es el que se utilizó para la representación de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita). Se optó por este modelo, debido a que es una herramienta de aplicación sencilla y muy utilizada a nivel mundial.

3.2 Determinación de parámetros hidrológicos.

Para poder elaborar el modelo hidrológico fue necesario determinar ciertos parámetros, los mismos son: (a) Parámetros relacionados con el modelo de infiltración. En la bibliografía se reportan varios métodos para determinar la lámina infiltrada (CN-SCS, Green & Ampt, Horton, etc). En este trabajo, se utilizó el método de la Curva Numero (CN) del SCS (Soil Conservation Service, por sus siglas en inglés) debido a su sencillez de aplicación y su bajo requerimiento de datos para obtenerlo y (b) Parámetros relacionados con el modelo de transformación lluvia-caudal. En este estudio se seleccionó el hidrograma unitario de Clark.

3.2.1 Curva Número (CN) de cada subcuenca.

El método de la Curva Número, fue creado por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS por sus siglas en ingles) para estimar la lámina infiltrada. En el mismo, se propone una escorrentía directa P_e , la cual es siempre menor o igual a la lámina precipitada P . De igual modo, después que comienza la escorrentía, existe una cantidad adicional de agua retenida en la cuenca F_a , que es menor a una capacidad de retención potencial máxima S . Por otro lado se tiene una pérdida inicial antes del encharcamiento I_a , la cual no produce escurrimiento, por lo que la escorrentía potencial es $P - I_a$. La hipótesis que propone el método, es que las relaciones entre las dos cantidades reales junto con las dos cantidades potenciales son iguales (ecuación 7).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \text{ (Ecuación 7)}$$

Por principio de continuidad, se tiene la ecuación 8:

$$P = P_e + I_a + F_a \text{ (Ecuación 8)}$$

De donde combinando las ecuaciones 7 y 8 y resolviendo para P_e se obtiene la ecuación 9.

$$P_e = \frac{(p-I_a)^2}{P-I_a+S} \text{ (Ecuación 9)}$$

Las infiltraciones iniciales I_a , se toman según la ecuación 10, a la cual se arribó luego de los estudios a los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas (Chow, 1994).

$$I_a = 0.2S \text{ (Ecuación 10)}$$

Luego de representar gráficamente la información de P y de P_e para muchas cuencas (figura 20), se encontraron distintas curvas, las cuales fueron estandarizadas a través de un número adimensional de curva CN, el cual se encuentra en el intervalo de 0 a 100, donde el número 100 corresponde a superficies impermeables, mientras que los números menores que este valor corresponden a suelos naturales.

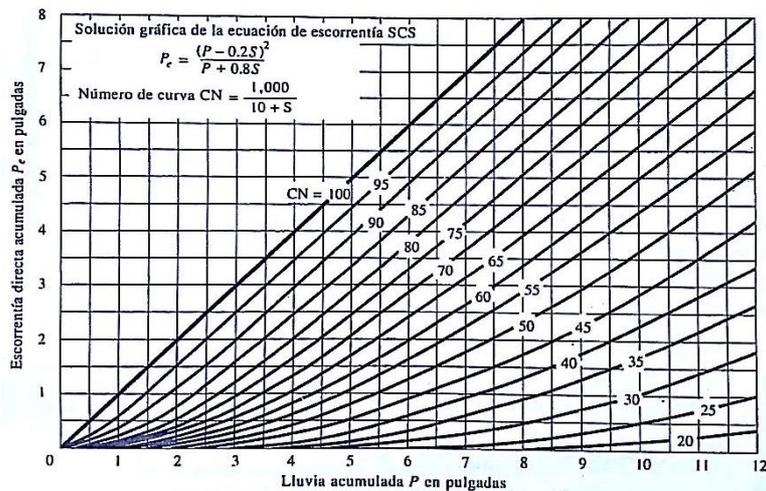


Figura 20: Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS (Chow V.T., 1994)

Los números de curva representados en la figura 20, se aplican para antecedentes de humedad normales (AMC II, según sus siglas en inglés). Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse con las ecuaciones 11 y 12.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10-0.058CN(II)} \text{ (Ecuación 11)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10+0.13CN(II)} \text{ (Ecuación 12)}$$

CAPÍTULO III – Elaboración del Modelo Hidrológico

En el presente estudio, se partió del conocimiento de la vegetación existente en la cuenca y el uso del suelo en la misma, con lo que se relacionó los distintos valores de NDVI calculados anteriormente con un valor de CN (humedad antecedente II), para un tipo de suelo B (correspondiente a suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa). A continuación se adjunta la tabla (tabla 33) presentada en el libro “Hidrología Aplicada”, Ven Te Chow (1994), donde se indican los números de curva para los distintos usos del suelo.

Tabla 33: Valores de CN según el uso del suelo (Chow V.T., 1994)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9
2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.
3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.
4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.
5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Para obtener un único valor de CN por subcuenca, lo cual es lo que requiere el modelo hidrológico a utilizar, se realizó un promedio ponderado de los valores de CN, teniendo en cuenta la cantidad de píxeles (COUNTS) que se obtuvieron del procesamiento de imágenes Landsat 8, vinculados a cada valor de CN.

A continuación se muestran los valores de CN obtenidos para condiciones de humedad I, II y III en todas las subcuencas.

- Cuenca Santa Rosa

La figura 21 muestra la cuenca del río Santa Rosa completa, con la correspondiente división en 5 subcuencas que la componen, mientras que en las figuras 22, 23, 24, 25 y 26 se muestran los mapas de NDVI reclasificado para cada una de las subcuencas. En las tablas 34, 35, 36, 37 y 38, se detallan los valores de CN I, CN II y CN III de cada subcuenca.



Figura 21: Subcuencas de la cuenca Santa Rosa

Santa Rosa Subcuenca 1 (Sub 1):

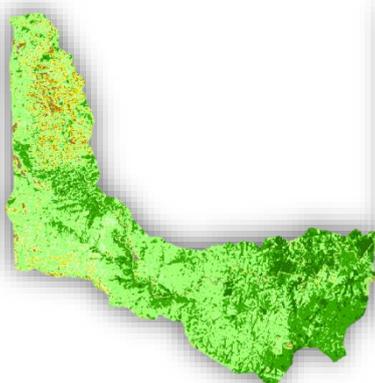


Figura 22: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 1 de cuenca Santa Rosa

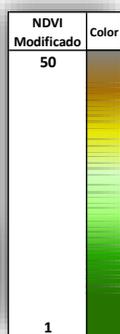


Tabla 34: Cálculo de valor de CN de Santa Rosa Subcuenca 1

Santa Rosa Subcuenca 1 (Sub 1)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	7459	410245
0.30 - 0.22	36 al 39	61	37696	2299456
0.22 - 0.16	40 al 42	61	63266	3859226
0.16 - 0.14	43	71	13799	979729
0.14 - 0.12	44	79	7696	607984
0.12 - 0.10	45	81	2886	233766
0.10 - 0.00	46 al 50	85	944	80240
Totales			133746	8470646
CN (I)			42.0	
CN (II)			63.3	
CN (III)			79.9	

Santa Rosa Subcuenca 2 (Sub 2):

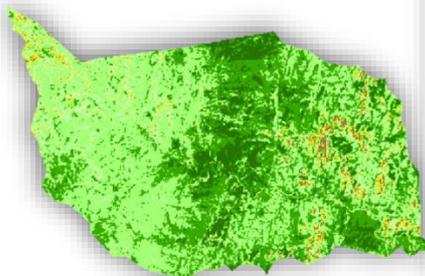


Figura 23: Mapa NDVI Santa Rosa subcuenca 2 de cuenca Santa Rosa

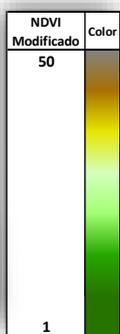


Tabla 35: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 2

Santa Rosa Subcuenca 2 (Sub 2)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	10877	598235
0.30 - 0.22	36 al 39	61	33206	2025566
0.22 - 0.16	40 al 42	61	48980	2987780
0.16 - 0.14	43	71	8032	570272
0.14 - 0.12	44	79	3619	285901
0.12 - 0.10	45	81	1421	115101
0.10 - 0.00	46 al 50	85	308	26180
Totales			106443	6609035
CN (I)			40.8	
CN (II)			62.1	
CN (III)			79.0	

Santa Rosa Subcuenca 3 (Sub 3):

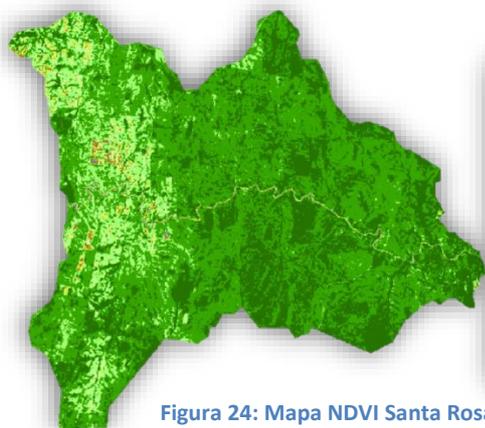


Figura 24: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 3 de cuenca Santa Rosa

Tabla 36: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 3

Santa Rosa Subcuenca 3 (Sub 3)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	70818	3894990
0.30 - 0.22	36 al 39	61	119506	7289866
0.22 - 0.16	40 al 42	61	25843	1576423
0.16 - 0.14	43	71	3767	267457
0.14 - 0.12	44	79	2139	168981
0.12 - 0.10	45	81	1086	87966
0.10 - 0.00	46 al 50	85	787	66895
Totales			223946	13352578
CN (I)			38.3	
CN (II)			59.6	
CN (III)			77.3	

Santa Rosa Subcuenca 4 (Sub 4):



Figura 25: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 4 de cuenca Santa Rosa

Tabla 37: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 4

Santa Rosa Subcuenca 4 (Sub 4)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	49820	2740100
0.30 - 0.22	36 al 39	61	56586	3451746
0.22 - 0.16	40 al 42	61	13690	835090
0.16 - 0.14	43	71	1464	103944
0.14 - 0.12	44	79	551	43529
0.12 - 0.10	45	81	52	4212
0.10 - 0.00	46 al 50	85	48	4080
Totales			122211	7182701
CN (I)			37.5	
CN (II)			58.8	
CN (III)			76.6	

Santa Rosa Subcuenca 5 (Sub 5):

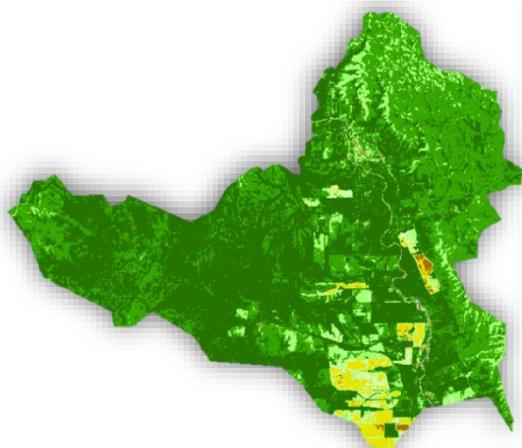


Figura 26: Mapa NDVI Santa Rosa Subcuenca 5 de cuenca Santa Rosa

Tabla 38: Cálculo de CN de Santa Rosa Subcuenca 5

Santa Rosa Subcuenca 5 (Sub 5)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	97326	5352930
0.30 - 0.22	36 al 39	61	70765	4316665
0.22 - 0.16	40 al 42	61	14040	856440
0.16 - 0.14	43	71	3612	256452
0.14 - 0.12	44	79	5654	446666
0.12 - 0.10	45	81	768	62208
0.10 - 0.00	46 al 50	85	429	36465
Totales			192594	11327826
CN (I)			37.5	
CN (II)			58.8	
CN (III)			76.7	

- Cuenca Arroyo Amboy

En la figura 27 se muestra la cuenca del Arroyo Amboy, la cual no se encuentra subdividida en subcuencas. En la tabla 39 se detallan los valores de CN I, CN II y CN III.



Figura 27: Cuenca de arroyo Amboy y mapa NDVI

Tabla 39: Cálculo de CN de cuenca arroyo Amboy

Arroyo Amboy				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	49807	2739385
0.30 - 0.22	36 al 39	61	55440	3381840
0.22 - 0.16	40 al 42	61	4816	293776
0.16 - 0.14	43	71	868	61628
0.14 - 0.12	44	79	1939	153181
0.12 - 0.10	45	81	476	38556
0.10 - 0.00	46 al 50	85	8	680
Totales			113354	6669046
CN (I)			37.5	
CN (II)			58.8	
CN (III)			76.7	

- Cuenca río Grande

La figura 28 muestra la cuenca del río Grande completa, con la correspondiente división en 7 subcuencas que la componen, mientras que en las figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35 se muestran los mapas de NDVI reclasificado para cada una de las subcuencas. En las tablas 40, 41, 42, 43, 44, 45 y 46, se detallan los valores de CN I, CN II y CN III de cada subcuenca.

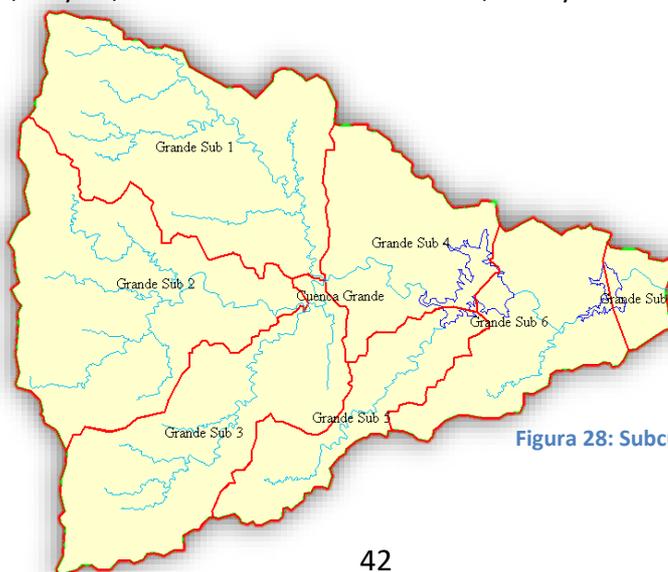


Figura 28: Subcuencas de la cuenca río Grande

Grande Subcuenca 1 (Sub 1):

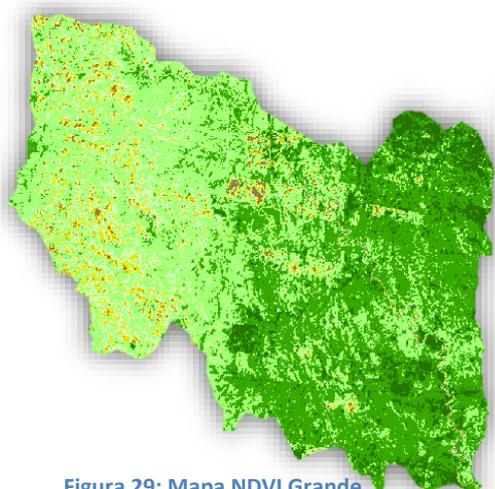


Figura 29: Mapa NDVI Grande Subcuenca 1 de cuenca Río Grande

Tabla 40: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 1

Grande Subcuenca 1 (Sub 1)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	18465	1015575
0.30 - 0.22	36 al 39	61	85902	5240022
0.22 - 0.16	40 al 42	61	91545	5584245
0.16 - 0.14	43	71	26262	1864602
0.14 - 0.12	44	79	12667	1000693
0.12 - 0.10	45	81	2952	239112
0.10 - 0.00	46 al 50	85	985	83725
Totales			238778	15027974
CN (I)			41.6	
CN (II)			62.9	
CN (III)			79.6	

Grande Subcuenca 2 (Sub 2):

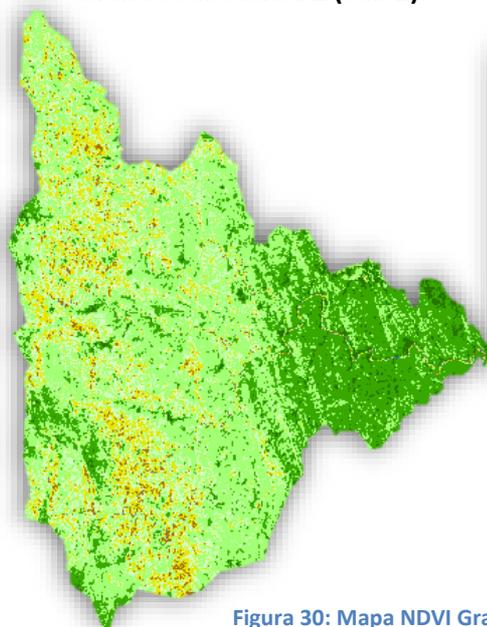


Figura 30: Mapa NDVI Grande Subcuenca 2 de cuenca Río Grande

Tabla 41: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 2

Grande Subcuenca 2 (Sub 2)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	5059	278245
0.30 - 0.22	36 al 39	61	50723	3094103
0.22 - 0.16	40 al 42	61	100166	6110126
0.16 - 0.14	43	71	42328	3005288
0.14 - 0.12	44	79	25172	1988588
0.12 - 0.10	45	81	4669	378189
0.10 - 0.00	46 al 50	85	736	62560
Totales			228853	14917099
CN (I)			44.0	
CN (II)			65.2	
CN (III)			81.2	

Grande Subcuenca 3 (Sub 3):

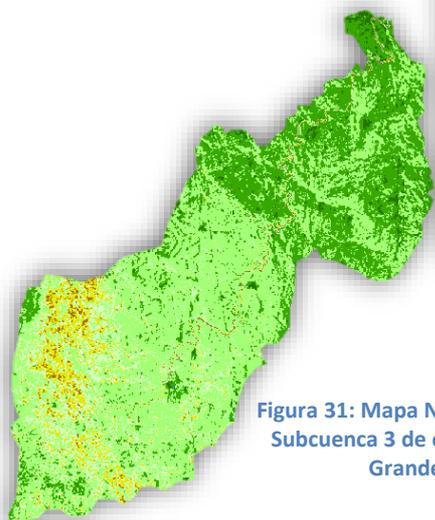


Figura 31: Mapa NDVI Grande Subcuenca 3 de cuenca Río Grande

Tabla 42: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 3

Grande Subcuenca 3 (Sub 3)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	3245	178475
0.30 - 0.22	36 al 39	61	50654	3089894
0.22 - 0.16	40 al 42	61	95492	5825012
0.16 - 0.14	43	71	22545	1600695
0.14 - 0.12	44	79	11087	875873
0.12 - 0.10	45	81	2081	168561
0.10 - 0.00	46 al 50	85	581	49385
Totales			185685	11787895
CN (I)			42.2	
CN (II)			63.5	
CN (III)			80.0	

Grande Subcuenca 4 (Sub 4):

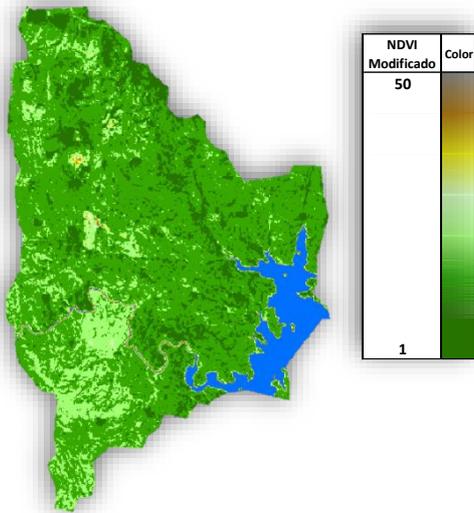


Tabla 43: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 4

Grande Subcuenca 4 (Sub 4)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	19350	1064250
0.30 - 0.22	36 al 39	61	78263	4774043
0.22 - 0.16	40 al 42	61	16079	980819
0.16 - 0.14	43	71	662	47002
0.14 - 0.12	44	79	364	28756
0.12 - 0.10	45	81	270	21870
0.10 - 0.00	46 al 50	85	1014	86190
Totales			116002	7002930
CN (I)			39.0	
CN (II)			60.4	
CN (III)			77.8	

Figura 32: Mapa NDVI Grande Subcuenca 4 de cuenca Río Grande

Grande Subcuenca 5 (Sub5):

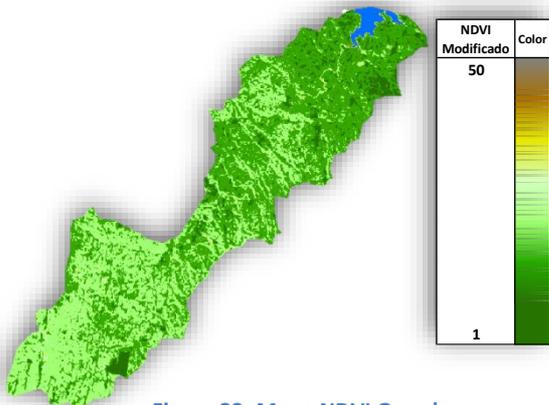


Tabla 44: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 5

Grande Subcuenca 5 (Sub 5)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	5819	320045
0.30 - 0.22	36 al 39	61	45070	2749270
0.22 - 0.16	40 al 42	61	35185	2146285
0.16 - 0.14	43	71	752	53392
0.14 - 0.12	44	79	148	11692
0.12 - 0.10	45	81	44	3564
0.10 - 0.00	46 al 50	85	147	12495
Totales			87165	5296743
CN (I)			39.4	
CN (II)			60.8	
CN (III)			78.1	

Figura 33: Mapa NDVI Grande Subcuenca 5 de cuenca Río Grande

Grande Subcuenca 6 (Sub 6):

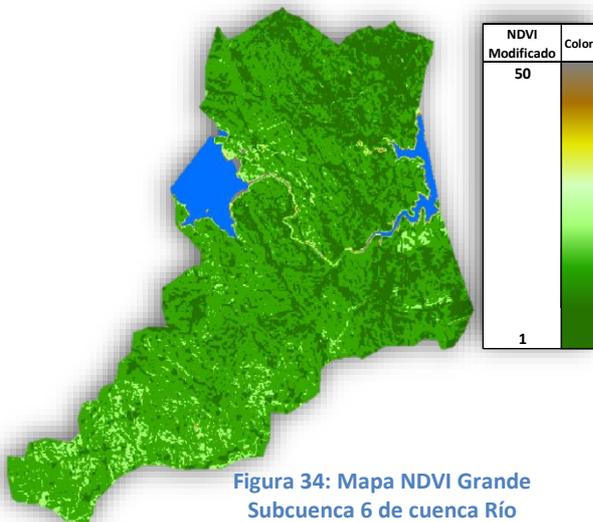


Tabla 45: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 6

Grande Subcuenca 6 (Sub 6)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	33846	1861530
0.30 - 0.22	36 al 39	61	70854	4322094
0.22 - 0.16	40 al 42	61	6657	406077
0.16 - 0.14	43	71	320	22720
0.14 - 0.12	44	79	254	20066
0.12 - 0.10	45	81	208	16848
0.10 - 0.00	46 al 50	85	799	67915
Totales			112938	6717250
CN (I)			38.1	
CN (II)			59.5	
CN (III)			77.1	

Figura 34: Mapa NDVI Grande Subcuenca 6 de cuenca Río Grande

Grande Subcuenca 7 (Sub7):



Tabla 46: Cálculo de CN de Grande Subcuenca 7

Grande Subcuenca 7 (Sub 7)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	9606	528330
0.30 - 0.22	36 al 39	61	10966	668926
0.22 - 0.16	40 al 42	61	1255	76555
0.16 - 0.14	43	71	360	25560
0.14 - 0.12	44	79	549	43371
0.12 - 0.10	45	81	131	10611
0.10 - 0.00	46 al 50	85	400	34000
Totales			23267	1387353
CN (I)			38.3	
CN (II)			59.6	
CN (III)			77.3	

Figura 35: Mapa NDVI Grande Subcuenca 7 de cuenca Río Grande

- Cuenca Quillinzo

La figura 36 muestra la cuenca del río Quillinzo completa, con la correspondiente división en 3 subcuencas que la componen, mientras que en las figuras 37, 38 y 39 se muestran los mapas de NDVI reclasificado para cada una de las subcuencas. En las tablas 47, 48 y 49, se detallan los valores de CN I, CN II y CN III de cada subcuenca.



Figura 36: Subcuencas de cuenca Quillinzo

Quillinzo Subcuenca 1 (Sub 1):

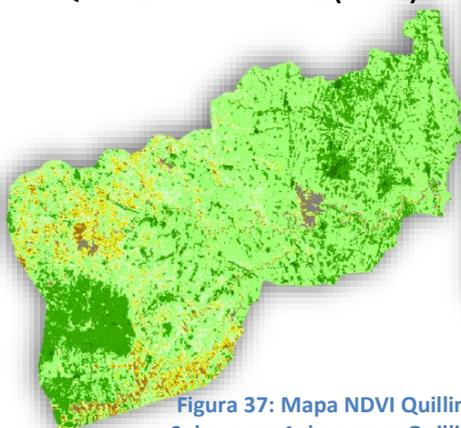


Figura 37: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 1 de cuenca Quillinzo

Tabla 47: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 1

Quillinzo Subcuenca 1 (Sub 1)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	1844	101420
0.30 - 0.22	36 al 39	61	34415	2099315
0.22 - 0.16	40 al 42	61	87243	5321823
0.16 - 0.14	43	71	19336	1372856
0.14 - 0.12	44	79	11075	874925
0.12 - 0.10	45	81	3517	284877
0.10 - 0.00	46 al 50	85	1852	157420
Totales			159282	10212636
CN (I)			42.9	
CN (II)			64.1	
CN (III)			80.4	

Quillinzo Subcuenca 2(Sub 2):

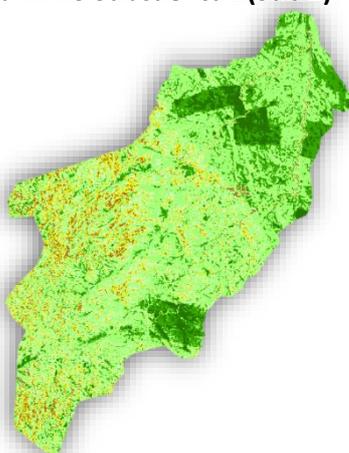


Figura 38: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 2 de cuenca Quillinzo

Tabla 48: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 2

Quillinzo Subcuenca 2 (Sub 2)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	8590	472450
0.30 - 0.22	36 al 39	61	31430	1917230
0.22 - 0.16	40 al 42	61	93438	5699718
0.16 - 0.14	43	71	33603	2385813
0.14 - 0.12	44	79	21023	1660817
0.12 - 0.10	45	81	6515	527715
0.10 - 0.00	46 al 50	85	1292	109820
Totales			195891	12773563
CN (I)			44.0	
CN (II)			65.2	
CN (III)			81.2	

Quillinzo Subcuenca 3 (Sub 3):



Figura 39: Mapa NDVI Quillinzo Subcuenca 3 de cuenca Quillinzo

Tabla 49: Cálculo de CN de Quillinzo Subcuenca 3

Quillinzo Subcuenca 3 (Sub 3)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	50752	2791360
0.30 - 0.22	36 al 39	61	214487	13083707
0.22 - 0.16	40 al 42	61	57482	3506402
0.16 - 0.14	43	71	1906	135326
0.14 - 0.12	44	79	1226	96854
0.12 - 0.10	45	81	680	55080
0.10 - 0.00	46 al 50	85	1785	151725
Totales			328318	19820454
CN (I)			39.0	
CN (II)			60.4	
CN (III)			77.8	

- Cuenca La Cruz

La figura 40 muestra la cuenca del río La Cruz completa, con la correspondiente división en 4 subcuencas que la componen, mientras que en las figuras 41, 42, 43 y 44 se muestran los mapas de NDVI reclasificado para cada una de las subcuencas. En las tablas 50, 51, 52 y 53, se detallan los valores de CN I, CN II y CN III de cada subcuenca.



Figura 40: Subcuencas de cuenca La Cruz

La Cruz Subcuenca 1 (Sub 1):

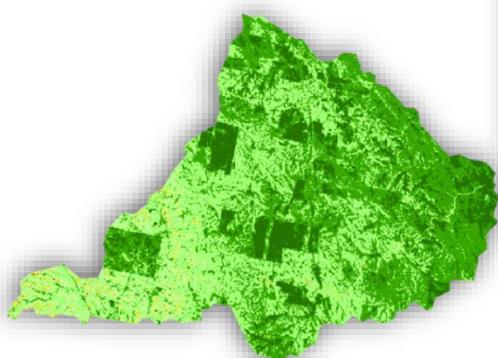


Figura 41: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 1 de cuenca La Cruz

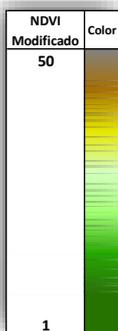


Tabla 50: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 1

La Cruz Subcuenca 1 (Sub 1)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	29826	1640430
0.30 - 0.22	36 al 39	61	85498	5215378
0.22 - 0.16	40 al 42	61	74587	4549807
0.16 - 0.14	43	71	7824	555504
0.14 - 0.12	44	79	2762	218198
0.12 - 0.10	45	81	364	29484
0.10 - 0.00	46 al 50	85	25	2125
Totales			200.886	12.210.926
CN (I)			39.4	
CN (II)			60.8	
CN (III)			78.1	

La Cruz Subcuenca 2 (Sub 2):

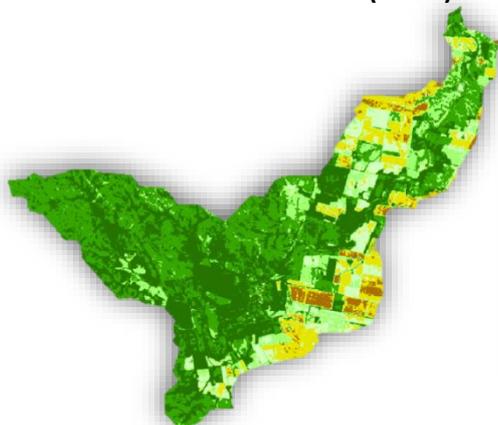


Figura 42: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 2 de cuenca La Cruz



Tabla 51: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 2

La Cruz Subcuenca 2 (Sub 2)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	34030	1871650
0.30 - 0.22	36 al 39	61	37910	2312510
0.22 - 0.16	40 al 42	61	12308	750788
0.16 - 0.14	43	71	8580	609180
0.14 - 0.12	44	79	10628	839612
0.12 - 0.10	45	81	2987	241947
0.10 - 0.00	46 al 50	85	12	1020
Totales			106455	6626707
CN (I)			40.9	
CN (II)			62.2	
CN (III)			79.1	

La Cruz Subcuenca 3 (Sub 3):



Figura 43: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 3 de cuenca La Cruz

Tabla 52: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 3

La Cruz Subcuenca 3 (Sub 3)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	35607	1958385
0.30 - 0.22	36 al 39	61	97311	5935971
0.22 - 0.16	40 al 42	61	25262	1540982
0.16 - 0.14	43	71	2433	172743
0.14 - 0.12	44	79	3758	296882
0.12 - 0.10	45	81	1561	126441
0.10 - 0.00	46 al 50	85	199	16915
Totales			166131	10048319
CN (I)			39.1	
CN (II)			60.5	
CN (III)			77.9	

La Cruz Subcuenca 4 (Sub 4):

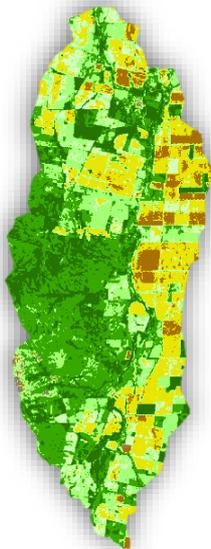


Figura 44: Mapa NDVI La Cruz Subcuenca 4 de cuenca La Cruz

Tabla 53: Cálculo de CN de La Cruz Subcuenca 4

La Cruz Subcuenca 4 (Sub 4)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	17700	973500
0.30 - 0.22	36 al 39	61	32279	1969019
0.22 - 0.16	40 al 42	61	19478	1188158
0.16 - 0.14	43	71	9599	681529
0.14 - 0.12	44	79	20242	1599118
0.12 - 0.10	45	81	5653	457893
0.10 - 0.00	46 al 50	85	238	20230
Totales			105189	6889447
CN (I)			44.4	
CN (II)			65.5	
CN (III)			81.4	

- Cuenca Planicie

La figura 45 muestra la cuenca Planicie completa, con la correspondiente división en 2 subcuencas que la componen, mientras que en las figuras 46 y 47 se muestran los mapas de NDVI reclasificado para cada una de las subcuencas. En las tablas 54 y 55 se detallan los valores de CN I, CN II y CN III de cada subcuenca. Como puede observarse en las imágenes procesadas, se observa que el uso de suelo es principalmente agropecuario.



Figura 45: Subcuencas de cuenca Planicie

Planicie Subcuenca 1 (Sub 1):

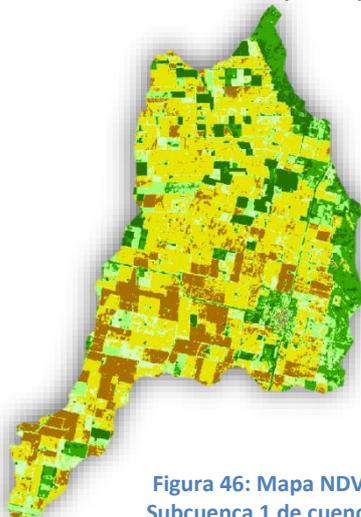


Figura 46: Mapa NDVI Planicie Subcuenca 1 de cuenca Planicie

Tabla 54: Cálculo de CN de Planicie Subcuenca 1

Planicie Subcuenca 1 (Sub 1)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	20717	1139435
0.30 - 0.22	36 al 39	61	28785	1755885
0.22 - 0.16	40 al 42	61	24165	1474065
0.16 - 0.14	43	71	25537	1813127
0.14 - 0.12	44	79	106874	8443046
0.12 - 0.10	45	81	41199	3337119
0.10 - 0.00	46 al 50	85	422	35870
Totales			247699	17998547
CN (I)			52.7	
CN (II)			72.7	
CN (III)			85.9	

Planicie Subcuenca 2 (Sub 2):

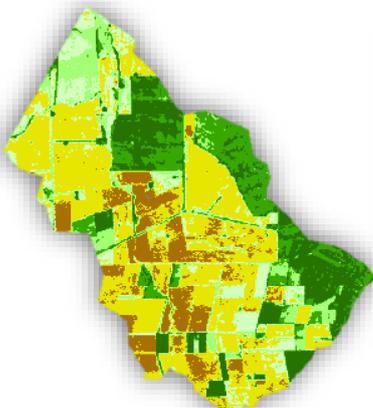


Figura 47: Mapa NDVI Planicie Subcuenca 2 de cuenca Planicie

Tabla 55: Cálculo de CN de Planicie Subcuenca 2

Planicie Subcuenca 2 (Sub 2)				
Valor NDVI	Valor NDVI reclasificado	Valor CN	Counts ArcGIS	Counts * CN
1.00 - 0.30	1 al 35	55	8136	447480
0.30 - 0.22	36 al 39	61	7456	454816
0.22 - 0.16	40 al 42	61	5981	364841
0.16 - 0.14	43	71	6658	472718
0.14 - 0.12	44	79	20739	1638381
0.12 - 0.10	45	81	6358	514998
0.10 - 0.00	46 al 50	85	10	850
Totales			55338	3894084
CN (I)			49.9	
CN (II)			70.4	
CN (III)			84.5	

3.2.2 Hidrograma unitario de Clark.

El hidrograma unitario de Clark es un método de transformación lluvia caudal desarrollado por Clark en 1945. Este método, al igual que todos los métodos que utilizan hidrogramas unitarios sintéticos, es empleado cuando no se cuenta con los datos de caudales de escurrimiento debido a una precipitación. El mismo está basado en el principio de superposición de hidrogramas, donde el hidrograma de una cuenca entera, es igual a la suma de todos los hidrogramas aportados por las distintas subcuencas, pero estos debidamente modificados por el efecto de almacenamiento en el cauce, es decir considerando el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca (Ramírez, 2003).

El método de Clark requiere de dos datos para el cálculo de los hidrogramas. Uno es el tiempo de concentración, el cual se detalló anteriormente, y el otro dato es el coeficiente de almacenamiento conocido como “k” de Clark, que tiene en cuenta el efecto de almacenamiento en la red de cauces de la cuenca. Para obtener este valor, una buena aproximación del mismo puede obtenerse multiplicando el valor del tiempo de concentración por 0,75 (Sánchez, 2011). De esta manera como punto de partida para realizar el modelo, se tomó el valor de “k” de Clark como $0.75 \cdot T_c$ (tabla 56).

Tabla 56: Valor de "k" de Clark de cada subcuenca a partir de expresión $0.75 \cdot T_c$

Sub cuenca	"k" de Clark
Grande Sub 1	3.10
Grande Sub 2	2.87
Grande Sub 3	2.84
Grande Sub 4	3.12
Grande Sub 5	2.93
Grande Sub 6	1.82
Grande Sub 7	1.23
Santa Rosa Sub 1	3.25
Santa Rosa Sub 2	1.65
Santa Rosa Sub 3	3.04
Santa Rosa Sub 4	1.33
Santa Rosa Sub 5	3.33
Quillinzo Sub 1	2.53
Quillinzo Sub 2	3.01
Quillinzo Sub 3	7.24
La Cruz Sub 1	3.94
La Cruz Sub 2	3.93
La Cruz Sub 3	2.84
La Cruz Sub 4	4.01
Planicie Sub 1	2.84
Planicie Sub 2	2.64
Amboy	2.60

3.3 Distribución temporal y espacial de la lluvia.

3.3.1 Datos.

Los datos de precipitaciones son provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (www.hidricos.gov.ar), que realiza una lectura diaria de las precipitaciones a través de estaciones de medición pluviométricas ubicadas en la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).

En el área de estudio se encuentran seis estaciones pluviométricas utilizadas para determinar la distribución espacial de la lluvia. Las mismas son Cerro Blanco (32°07'60.00"S ; 64°55'00.00"O), El Manzano (32°22'00.00"S ; 64°53'00.00"O), El Durazno (32°13'60.00"S ; 64°46'60.00"O), Lutti (32°17'60.00"S ; 64°44'00.00"O), Pampichuela (32°07'60.00"S ; 64°48'60.00"O) y Yacanto (32°06'00.00"S ; 64°45'00.00"O), su ubicación dentro de la cuenca se muestran en la figura 48.

A continuación se presentan los valores obtenidos de las series históricas de precipitaciones para el día 14 de febrero de 2014 (Tabla 57):

Tabla 57: Precipitaciones medidas el día 14 de febrero de 2014

Estación Pluviométrica	Precipitación del 14/02/2014 [mm]
Cerro Blanco	230
El Manzano	210
Lutti	230
Pampichuela	155
Yacanto	169
El Durazno	142

3.3.2 Distribución espacial - Polígonos de Thiessen.

Los polígonos de Thiessen es un método de ponderación que permite obtener la precipitación media areal en base a datos de precipitaciones puntuales. Este método establece que en determinadas áreas de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano, aplicándose su lectura registrada hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier sentido (Chow, 1994).

Finalmente para obtener la precipitación media areal se pondera la lectura de cada estación pluviométrica con el área correspondiente a su polígono de influencia con la ecuación 13:

$$P = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{j=N} A_j P_j \text{ (Ecuación 13)}$$

Siendo: - A: Área total (km²)

- P: Precipitación promedio (mm)

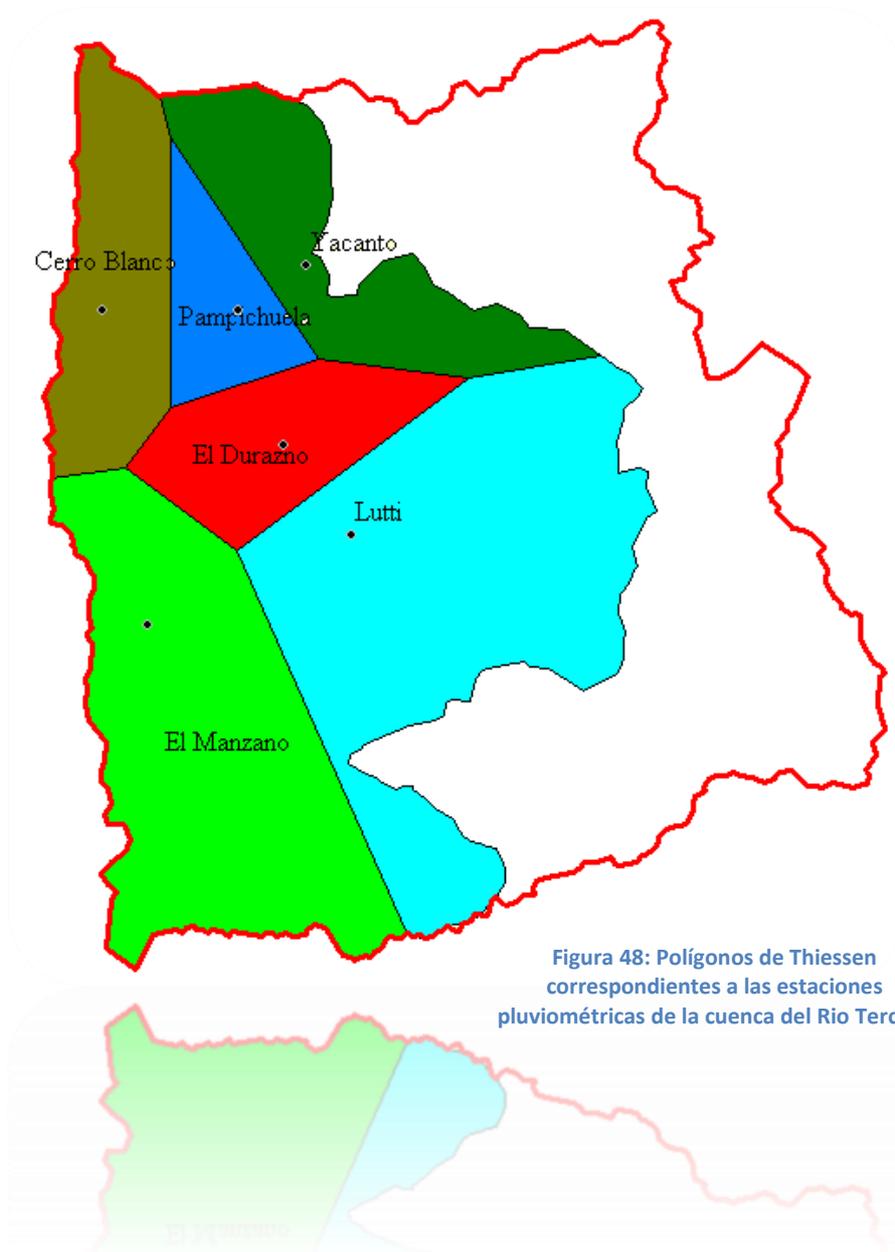
- N: Cantidad de pluviómetros analizados

CAPÍTULO III – Elaboración del Modelo Hidrológico

En la figura 48 se presentan los polígonos de Thiessen correspondientes al área de estudio y sus estaciones pluviométricas.

En el presente trabajo, para la distribución de la precipitación, no se utilizó toda el área de la cuenca, sino que se seleccionó un área de escurrimiento efectivo. Esta área representa un sector de la cuenca en donde las precipitaciones registradas generan importantes escurrimientos en los distintos tributarios. Dicha área, ubicada en el sector de las altas cumbres cordobesas (sector Oeste de la cuenca de estudio), posee una extensión de 2020.22km², y fue seleccionada en virtud de la experiencia adquirida por el grupo y observaciones realizadas por lugareños y diferentes organismos de gestión.

De esta manera no se toma en cuenta la parte baja de la cuenca de estudio (representada en blanco en Figura 48) por no aportar escurrimiento superficial significativo.



A continuación se presenta una tabla resumen de la aplicación del método de polígonos de Thiessen a la cuenca de estudio (tabla 58)

Tabla 58: Resumen de aplicación del método de polígonos de Thiessen en la cuenca

Estación Pluviométrica	Área [Km ²]	Precipitación del 14/02/2014 [mm]
Cerro Blanco	232.49	230
El Manzano	551.94	210
Lutti	687.43	230
Pampichuela	115.99	155
Yacanto	245.57	169
El Durazno	186.80	142
Cuenca completa	2020.22	204.68

3.3.3 Distribución temporal.

Cuando se realiza modelación hidrológica de grandes cuencas es importante definir la duración del evento como así también su distribución temporal. La duración de la lluvia el día 14 de febrero de 2014 fue de 12 hs (Informe del MAAySP, 2014). Debido a la falta de conocimiento acerca de cómo se distribuyó la lluvia en esas 12 horas, se seleccionó el hietograma sintético de la estación La Suela desarrollado mediante el método de Huff por Camaño Nelli y Dasso, 2000. En la tabla 59 se muestra los porcentajes de lámina precipitada para cada sextil, mientras que en la figura 49, se muestra el hietograma con los porcentajes correspondientes a las precipitaciones de 12 hs de duración (resaltado en color anaranjado en la tabla 59).

Tabla 59: Hietograma sintético de la estación La Suela

ESTACION LA SUELA						
Duración (MIN)	Nº SEXTIL					
	1	2	3	4	5	6
30	14.3	16.7	16.5	19.6	17.3	15.6
60	17.0	23.8	27.5	15.0	12.1	4.6
90	18.8	31.3	27.5	10.0	8.3	4.2
120	13.3	31.7	35.0	6.3	9.5	4.2
180	20.0	38.3	16.7	11.3	7.9	5.8
360	15.0	40.0	17.5	11.3	11.7	4.6
720	41.7	15.8	17.5	12.5	9.4	3.1
1440	33.3	26.7	25.0	10.8	0.8	3.4

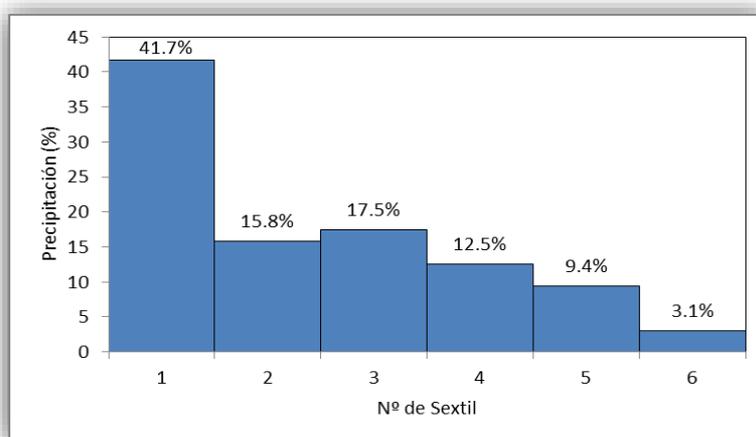


Figura 49: Distribución porcentual de lámina para la estación La Suela para 12 hs

3.4 Descripción del modelo utilizado: HEC-HMS.

El modelo hidrológico desarrollado en el presente trabajo, se efectuó utilizando el programa HEC-HMS, el cual es ampliamente utilizado para realizar cálculos hidrológicos. Este modelo, es un desarrollo del cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corp), y permite simular el proceso de precipitación-escorrentía en las distintas cuencas que sean modeladas, sin importar el tamaño de las mismas. El mismo puede ser utilizado para distintos fines, como estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observaciones del flujo, impactos de intervenciones en las cuencas, o como en el presente estudio, para servir de herramienta de apoyo para realizar manejo de embalses (Manual del usuario de HEC-HMS (2003)).

El modelo construido abarca un área de modelación de 3238km², la cual se divide en 22 subcuencas y cuenta con 5 ríos principales (Santa Rosa, Amboy, Grande, Quillinzo y La Cruz). A su vez, además de simular la transformación lluvia-caudal, se modela el tránsito del hidrograma generado en los cauces y en tres embalses (Cerro Pelado, Arroyo Corto y Río Tercero). Para simular el tránsito en los embalses fue necesario digitalizar y cargar en el modelo las curvas cota-área (figuras 50 y 51), cota-descarga (figuras 52, 53 y 54) y cota-volumen (figuras 55, 56 y 57).

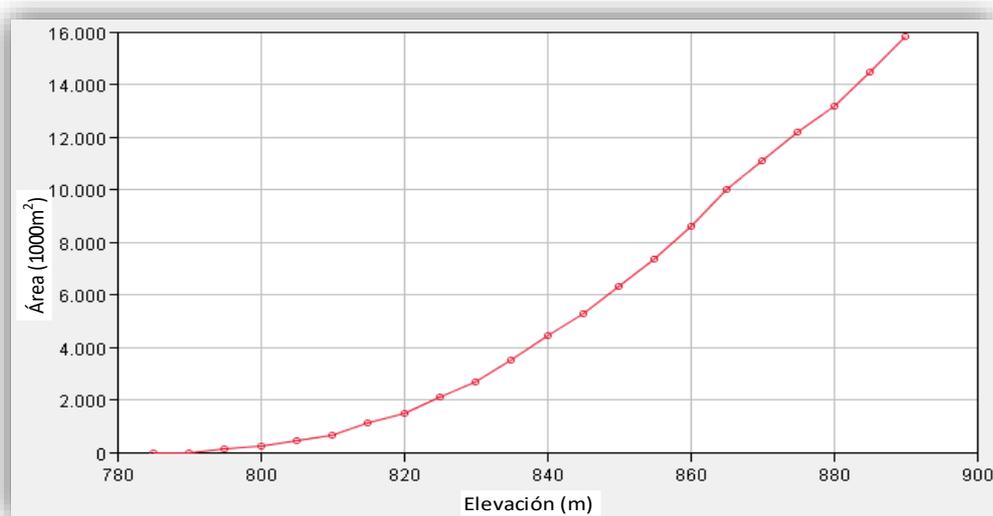


Figura 50: Curva Cota-Área de embalse Cerro Pelado

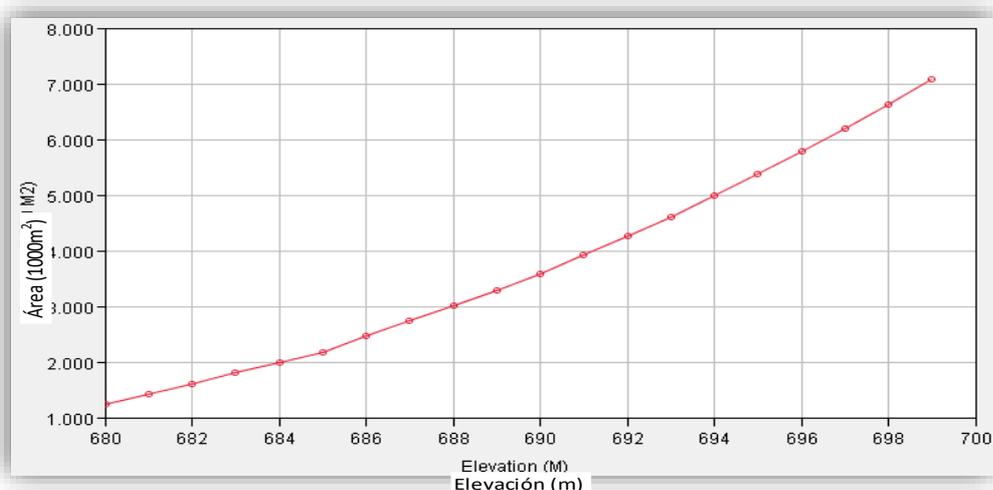


Figura 51: Curva Cota-Área de embalse Arroyo Corto

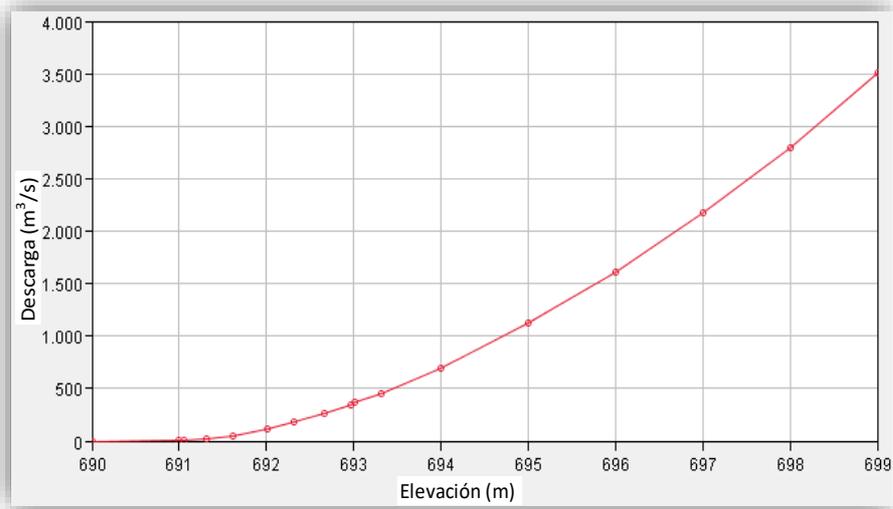


Figura 52: Curva Cota-Descarga de embalse Arroyo Corto

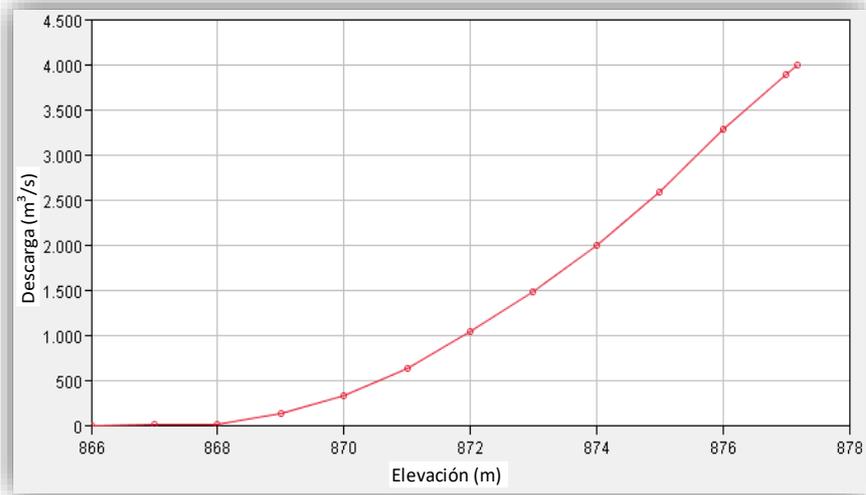


Figura 53: Curva Cota-Descarga de embalse Cerro Pelado

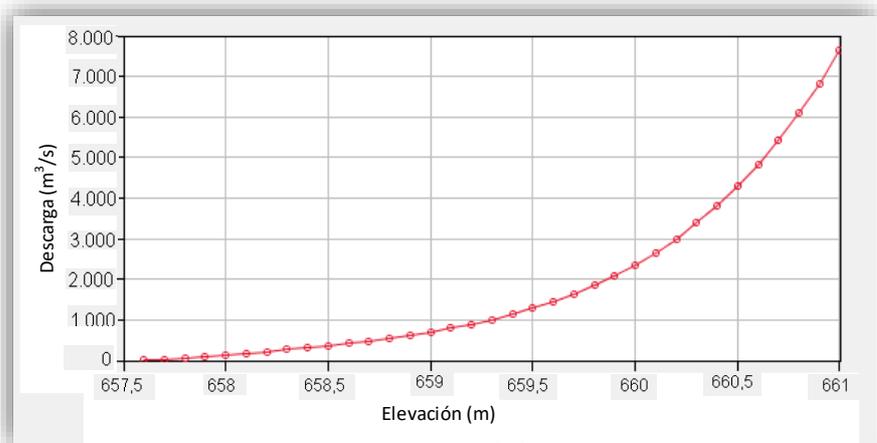


Figura 54: Curva Cota-Descarga de embalse Río Tercero

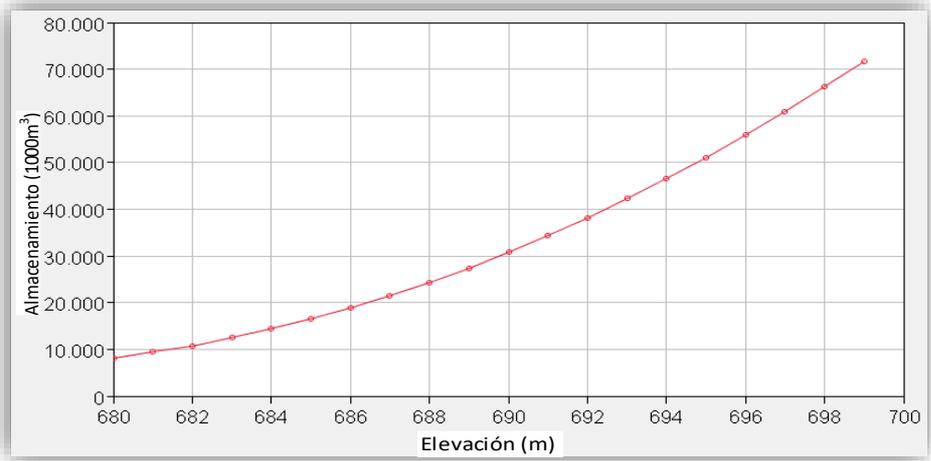


Figura 55: Curva Cota-Volumen de embalse Arroyo Corto

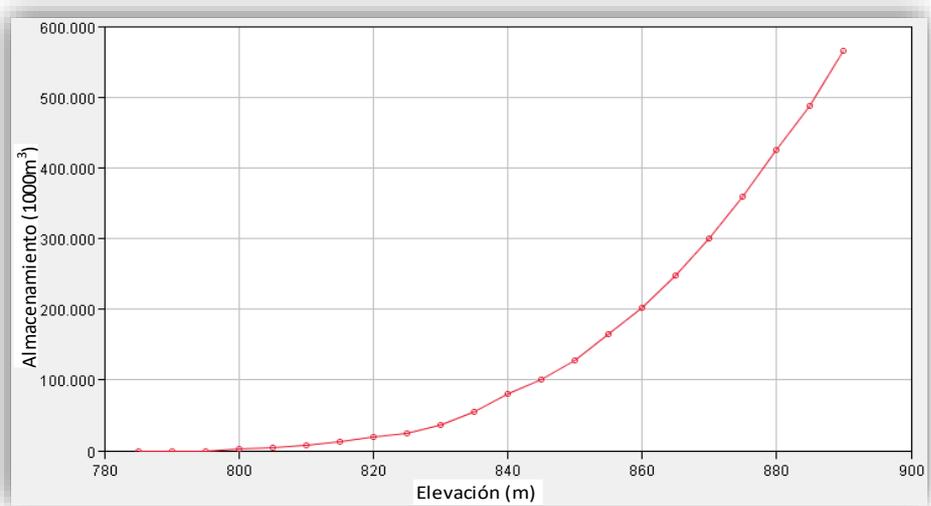


Figura 56: Curva Cota-Volumen de embalse Cerro Pelado

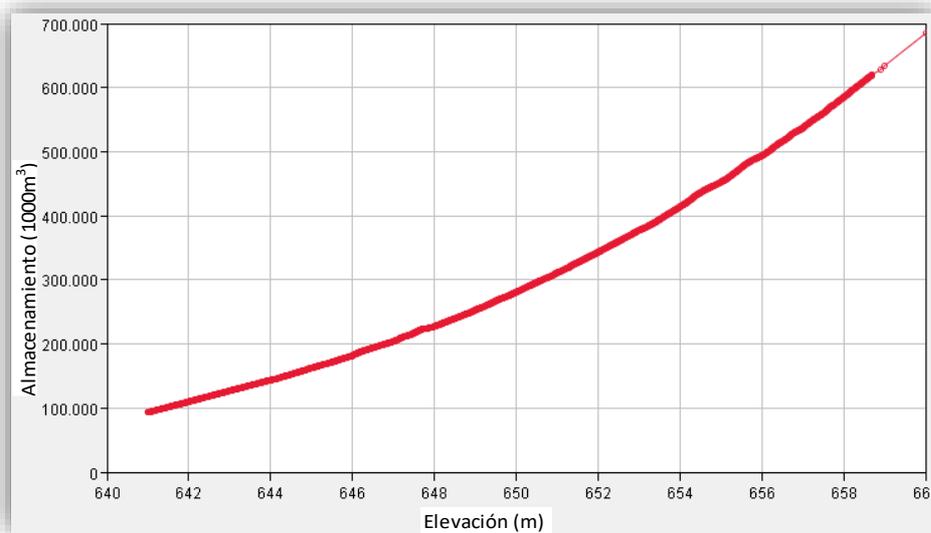


Figura 57: Curva Cota-Volumen de embalse Río Tercero

CAPÍTULO III – Elaboración del Modelo Hidrológico

En la figura 58 puede observarse el modelo llevado a cabo, donde se distinguen con los distintos colores las cuencas correspondientes a cada uno de los principales tributarios del embalse, y se observa cómo se conforman las subcuencas y los distintos tránsitos ya sean por cursos del río, como por los embalses existentes dentro del sistema.

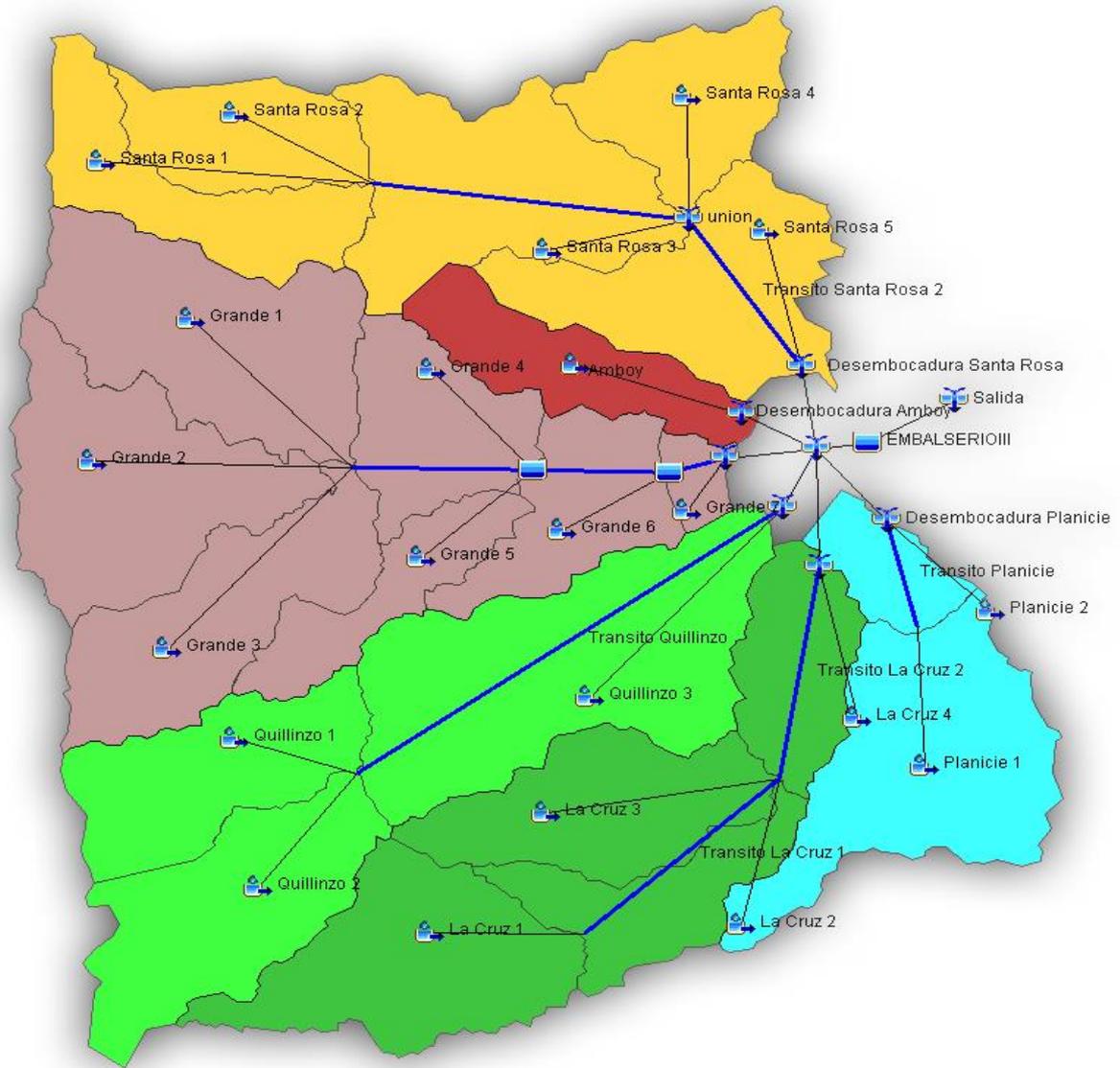


Figura 58: Modelo hidrológico de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita)

Capítulo IV



**Capítulo IV: Calibración del
modelo hidrológico para
reconstruir el evento
extraordinario del 14 de
febrero de 2014**

Capítulo IV: Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

4.1 Introducción.

Una vez elaborado el modelo hidrológico HEC-HMS para la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita), se procedió a calibrar al mismo a partir de las condiciones existentes en la cuenca el día del evento extraordinario de análisis (14 de febrero de 2014).

Para efectuar esta calibración, se utilizaron los datos de cota del embalse de río Tercero así como también sus caudales erogados por vertedero y válvula que fueron provistos por la Secretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

Finalmente a través de las herramientas de ajuste de HEC-HMS, se realizó un ajuste de los valores de CN y de “k” de Clark.

De esta manera, mediante la calibración del modelo se logra tener una herramienta que permite simular diferentes escenarios de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) que sirven de apoyo para la toma de decisiones y un manejo integral de la cuenca.

4.2 Condiciones existentes en la cuenca durante el evento.

4.2.1 Condiciones existentes de lluvia.

Como se ha detallado en el capítulo III, la precipitación del 14 de febrero de 2014 se obtuvo de mediciones puntuales diarias realizadas por la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación. Dichas precipitaciones puntuales, luego fueron distribuidas espacialmente en el área de precipitación efectiva realizando polígonos de Thiessen, con lo cual se obtuvo una lámina áreal de 204.68 mm.

Finalmente la lámina obtenida, la cual se conoce que tuvo una duración reportada por la Secretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba de 12 horas, debió ser distribuida temporalmente. Debido al desconocimiento de la distribución temporal de la lluvia, se utilizó un hietograma sintético calibrado para la cuenca de la Suela (cuenca con características similares a la cuenca de estudio) con el método de Huff.

En la figura 59 se presenta el hietograma de precipitación del evento del 14 de febrero de 2014 que se utilizó para calibrar el modelo.

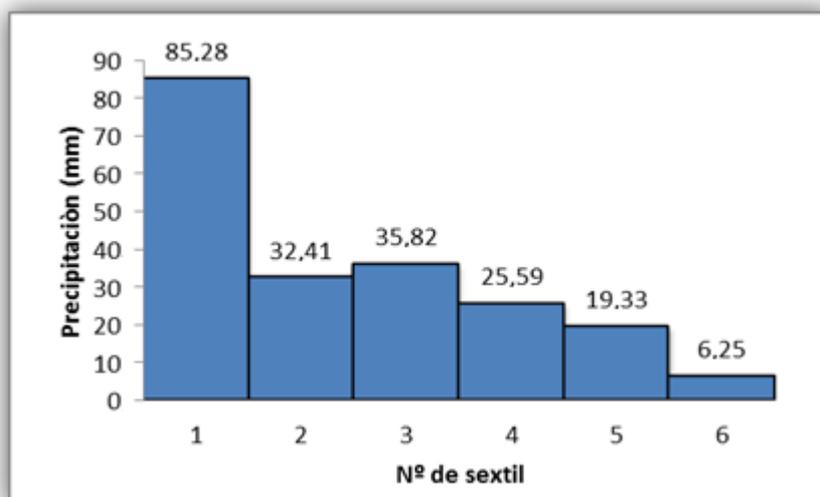


Figura 59: Distribución temporal de lámina de lluvia.

4.2.2 Condiciones existentes de embalses.

Para la calibración del modelo fue necesario conocer el nivel existente en los embalses al momento de generarse el evento y su evolución durante el mismo. En el caso de los embalses Cerro Pelado y Arroyo Corto, dicha información no se encuentra disponible. Ante esta falta de información, se tomó la suposición de que los embalses se encontraban llenos debido a los motivos que se expresan más adelante en este apartado. Para el embalse Río Tercero, el gobierno provincial suministro los datos de nivel del embalse y caudales erogados durante todo el evento de crecida.

- Embalse Cerro Pelado:

Este embalse está ubicado aguas arriba de toda la cadena de embalses, su principal función es la generación de electricidad a través de la central en Caverna de Cerro Pelado con un sistema de turbinado y bombeo.

Para el máximo aprovechamiento de este sistema, el embalse se encuentra normalmente lleno, por lo que, en vista a la falta de información de niveles del mismo, se consideró que este embalse se encontraba, al momento de comenzar el evento, en su cota de vertedero (868 msnm).

- Embalse Arroyo Corto:

Este embalse es el segundo del sistema, su principal función es ser el embalse compensador para el sistema de bombeo de la central en Caverna de Cerro Pelado, por lo que su capacidad de almacenamiento es muy limitada (35 Hm³).

Al ser el embalse compensador del sistema y tener una capacidad muy limitada de almacenamiento también se consideró que el mismo se encontraba en su cota de vertedero (691 msnm).

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

- Embalse Río Tercero:

El embalse de río Tercero es uno de los más antiguos de la provincia y es el de mayor capacidad en la misma (560 Hm³ a cota de vertedero). Este embalse posee múltiples funciones, entre las cuales se encuentran la generación de electricidad a través de la central Fitz Simon, cuerpo receptor de las aguas provenientes de los sistemas de enfriamiento de la central Nuclear, fines recreativos, abastecimiento de agua potable y regulación de crecidas.

El día del evento, este embalse se encontraba a una cota de 655.11 msnm, la misma estaba 2.39 metros por debajo de la cota de vertedero del embalse (657.50 msnm).

Durante el evento de crecida el pico de erogación del vertedero registrado alcanzó los 445.87 m³/s el día 15 de febrero (tabla 60). Cabe aclarar que en ese momento, el sistema de evacuación por válvulas contaba con una capacidad de erogación de 20 m³/s.

Tabla 60: Valores de Cota, Volumen y Caudal erogados por embalse Río Tercero luego del evento del 14 de febrero de 2014. Reportado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba

Fecha	Hora	Hora Acum [h]	Cota [m.s.n.m.]	Caudal [m ³ /s]	Volumen [Hm ³]
13/02/2014	13:30	0:00	655.06	20.00	455.95
14/02/2014	17:00	27.50	655.11	20.00	457.97
15/02/2014	4:00	38.50	658.57	428.09	612.62
15/02/2014	7:30	42.00	658.60	445.87	614.08
15/02/2014	16:00	50.50	658.57	428.09	612.62
16/02/2014	7:03	65.55	658.30	283.07	599.57
17/02/2014	9:30	68.00	658.31	288.01	600.05
18/02/2014	9:00	91.50	658.11	195.32	590.48
19/02/2014	9:30	116.00	658.06	174.21	588.10

4.3 Calibración de los parámetros hidrológicos.

4.3.1 Modelo de infiltración (CN).

Para la calibración del modelo de infiltración a utilizar, el cual utiliza el método de Curva Numero (CN) del SCS, se parte del valor de CN calculado a través del índice NDVI, el cual fue mostrado en capítulos precedentes.

Los valores de CN obtenidos deben ser ajustados mediante la información relevada en campo para representar adecuadamente el evento modelado. Para ello se tomó como valores iniciales los calculados mediante el índice NDVI, luego a través de las herramientas de ajuste de HEC-HMS se ajustó dichos valores utilizando la información provista. Cabe considerar que de este ajuste ningún valor a excepción de cuenca planicie se modificó en un cantidad mayor a +- 6.6 puntos del valor de CN obtenido con el índice NDVI. En la cuenca planicie, cuyo uso de suelo es actividades agrícolas (principalmente cultivo de soja), el valor de CN fue modificado notablemente debido a que en la imagen utilizada para el cálculo de NDVI el suelo se encontraba descubierto debido a las actividades de cosecha, produciendo un valor de CN mayor. Se adoptó un valor de 60 de acuerdo con lo reportado por el INTA para la cuenca del río Arrecifes (Havrylenko S.B. et al., 2012) que posee un uso de suelo similar (campos de soja).

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

De esta manera se obtuvieron los valores de CN modificados (CNIIa) presentados en la Tabla 62 junto con los valores iniciales (Tabla 61).

Tabla 61: Valores de CNII de cada una de las subcuencas.

Subcuenca	Valor CNII
Grande Sub 1	62.9
Grande Sub 2	65.2
Grande Sub 3	63.5
Grande Sub 4	60.4
Grande Sub 5	60.8
Grande Sub 6	59.5
Grande Sub 7	59.6
Santa Rosa Sub 1	63.3
Santa Rosa Sub 2	62.1
Santa Rosa Sub 3	59.6
Santa Rosa Sub 4	58.8
Santa Rosa Sub 5	58.8
Quillinzo Sub 1	64.1
Quillinzo Sub 2	65.2
Quillinzo Sub 3	60.4
La Cruz Sub 1	60.8
La Cruz Sub 2	62.2
La Cruz Sub 3	60.5
La Cruz Sub 4	65.5
Planicie Sub 1	72.7
Planicie Sub 2	70.4
Amboy	58.8

Tabla 62: Valores de CNIIa calibrados para cada una de las subcuencas.

Subcuenca	Valor CNIIa
Grande Sub 1	63.0
Grande Sub 2	63.0
Grande Sub 3	63.0
Grande Sub 4	64.7
Grande Sub 5	64.2
Grande Sub 6	64.0
Grande Sub 7	59.6
Santa Rosa Sub 1	65.0
Santa Rosa Sub 2	65.0
Santa Rosa Sub 3	62.0
Santa Rosa Sub 4	58.0
Santa Rosa Sub 5	59.5
Quillinzo Sub 1	67.0
Quillinzo Sub 2	67.0
Quillinzo Sub 3	67.0
La Cruz Sub 1	62.8
La Cruz Sub 2	62.2
La Cruz Sub 3	60.5
La Cruz Sub 4	65.5
Planicie Sub 1	60.0
Planicie Sub 2	60.0
Amboy	58.5

4.3.2 Modelo de transformación lluvia-caudal (Hidrograma unitario de Clark).

A partir del modelo construido en el Capítulo III con valor de “k” de Clark igual al 75% del tiempo de concentración, se realizó una calibración utilizando las herramientas de ajuste del programa HEC-HMS mencionados anteriormente. La diferencia relativa máxima encontrada fue un incremento del 29% de la Subcuenca Grande 6.

De esta manera se obtuvieron los valores de “k” de Clark iniciales (Tabla 63) junto con los valores calibrados (Tabla 64).

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

Tabla 63: Valores de "k" de Clark para cada una de las subcuencas.

Subcuenca	"k" de Clark
Grande Sub 1	3.10
Grande Sub 2	2.87
Grande Sub 3	2.84
Grande Sub 4	3.12
Grande Sub 5	2.93
Grande Sub 6	1.82
Grande Sub 7	1.23
Santa Rosa Sub 1	3.25
Santa Rosa Sub 2	1.65
Santa Rosa Sub 3	3.04
Santa Rosa Sub 4	1.33
Santa Rosa Sub 5	3.33
Quillinzo Sub 1	2.53
Quillinzo Sub 2	3.01
Quillinzo Sub 3	7.24
La Cruz Sub 1	3.94
La Cruz Sub 2	3.93
La Cruz Sub 3	2.84
La Cruz Sub 4	4.01
Planicie Sub 1	2.84
Planicie Sub 2	2.64
Amboy	2.60

Tabla 64: Valores de "k" de Clark calibrados para cada una de las subcuencas.

Subcuenca	"k" de Clark
Grande Sub 1	4.03
Grande Sub 2	3.73
Grande Sub 3	3.69
Grande Sub 4	4.06
Grande Sub 5	3.81
Grande Sub 6	2.56
Grande Sub 7	1.31
Santa Rosa Sub 1	4.23
Santa Rosa Sub 2	2.15
Santa Rosa Sub 3	3.95
Santa Rosa Sub 4	1.73
Santa Rosa Sub 5	4.33
Quillinzo Sub 1	3.29
Quillinzo Sub 2	3.91
Quillinzo Sub 3	9.41
La Cruz Sub 1	5.12
La Cruz Sub 2	5.11
La Cruz Sub 3	3.69
La Cruz Sub 4	5.21
Planicie Sub 1	3.69
Planicie Sub 2	3.43
Amboy	3.38

4.4 Resultados obtenidos.

Con los valores de la calibración obtenemos los hidrogramas de salida de cada uno de los afluentes y el hidrograma total de ingreso al embalse Río Tercero (figura 61).

Luego se obtuvo de la modelación los caudales pico (tabla 65), siendo el de mayor aporte el río Quillinzo con un caudal de 1304.2 m³/s. El resultado obtenido resulta razonable según lo observado en campo, donde se midió un nivel máximo de 5 metros desde una de las márgenes (figura 60).



Figura 60: Regla de 5 metros demarcando crecida de río Quillinzo.

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

Como era de esperarse el primer pico en llegar al embalse fue el del arroyo Amboy dado que es la cuenca más pequeña estudiada, y el último pico en arribar fue el del río Grande debido a que es la cuenca de mayor extensión y posee embalses.

El pico total de ingreso al embalse fue de 2907.6 m³/s. Dicho evento aportó un volumen total de 197.69 Hm³ el cual es aproximadamente 37% del volumen total del embalse.

Tabla 65: Caudales máximos de afluentes al embalse río Tercero.

Subcuenca	Caudal Maximo [m ³ /s]	Volumen Aportado [Hm ³]
Subcuenca Río Grande	875.00	85.39
Subcuenca Río Santa Rosa	539.70	21.68
Subcuenca Río Quillinzo	1304.20	65.29
Subcuenca Río La Cruz	371.20	16.99
Subcuenca Arroyo Amboy	220.20	8.34
Total	2907.60	197.69

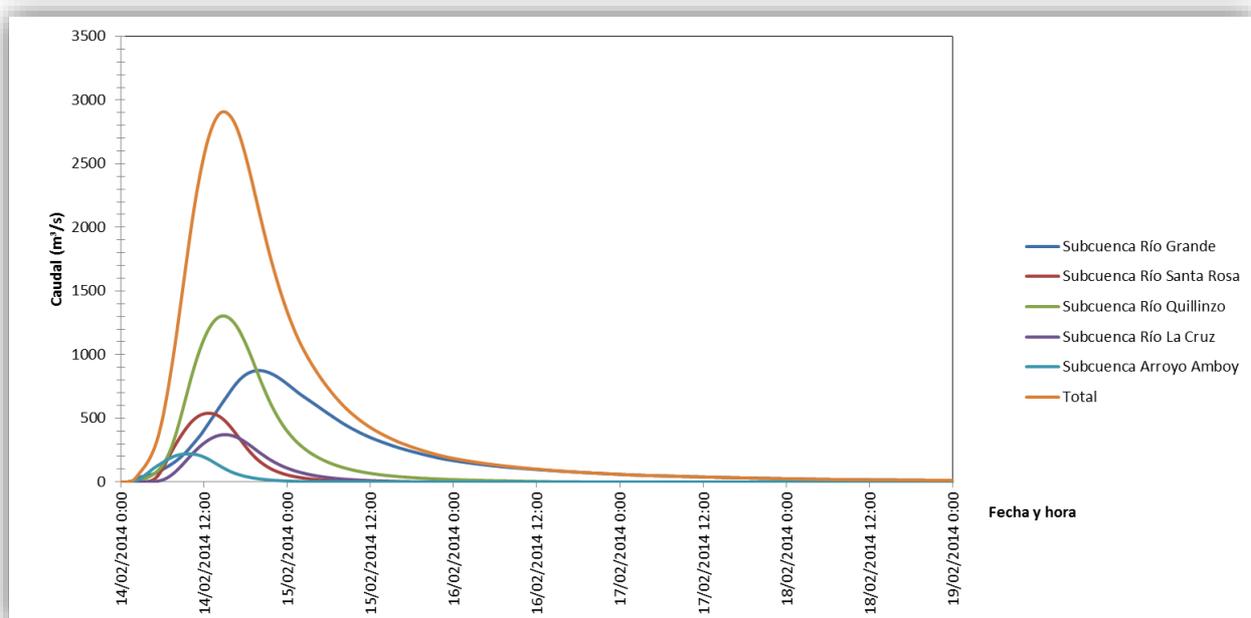


Figura 61: Hidrogramas de afluentes de embalse río Tercero.

Finalmente dimensionamos los efectos producidos por los hidrogramas presentados precedentemente a través de la variación volumétrica (figura 62) y de altura (figura 63) del embalse Río Tercero. De la modelación se obtiene que el máximo volumen que alcanzó el embalse fue de 610.05 Hm³ que representa una variación de 153.65 Hm³ respecto del volumen previo al evento, lo cual significa un aumento del 34% del volumen. Comparando estos valores con los registrados durante el evento, donde se midió un volumen máximo de 614.08 Hm³ (tabla 60), que representa una variación de 158.14 Hm³ lo cual representa una variación menor al 1% entre el volumen máximo medido y el volumen máximo modelado por HEC-HMS.

La altura del embalse modelada alcanzó un nivel máximo de 658.6 m.s.n.m., lo que representa un aumento de 3.5 metros respecto al nivel inicial del embalse y 1.1 metros por encima del nivel de vertedero del embalse (657.5 m.s.n.m.). Esta altura máxima coincidente con el valor máximo medido durante el evento (tabla 60).

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

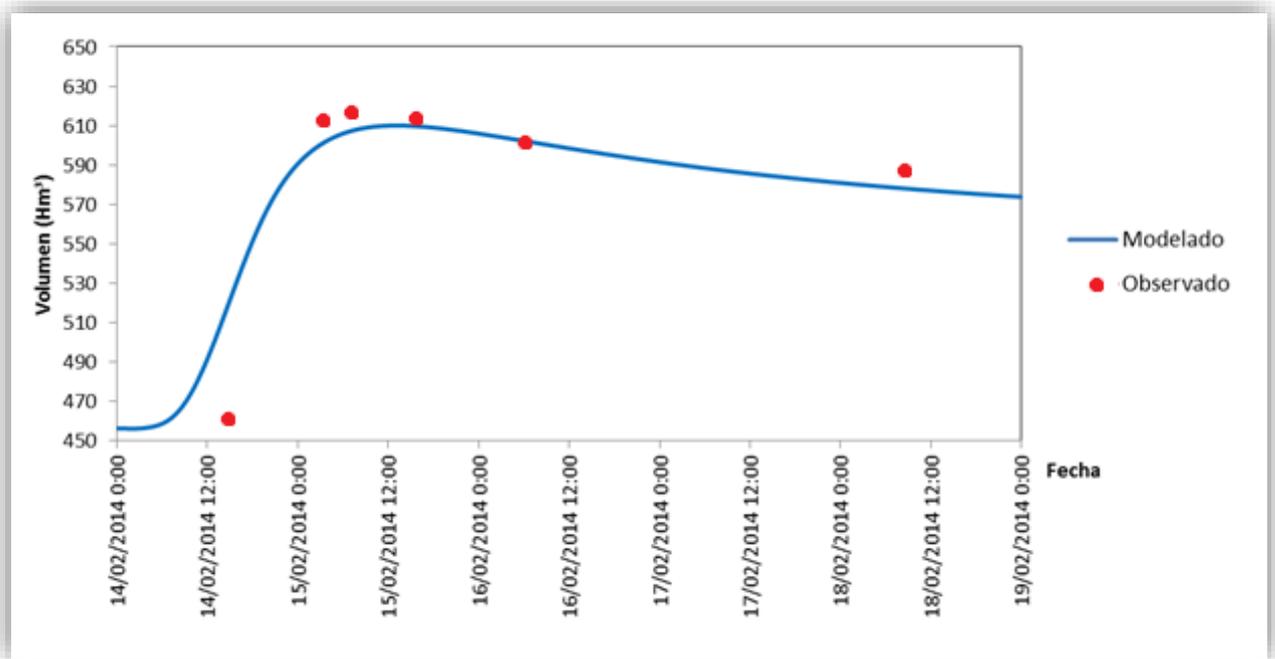


Figura 62: Variación volumétrica del embalse Río Tercero.

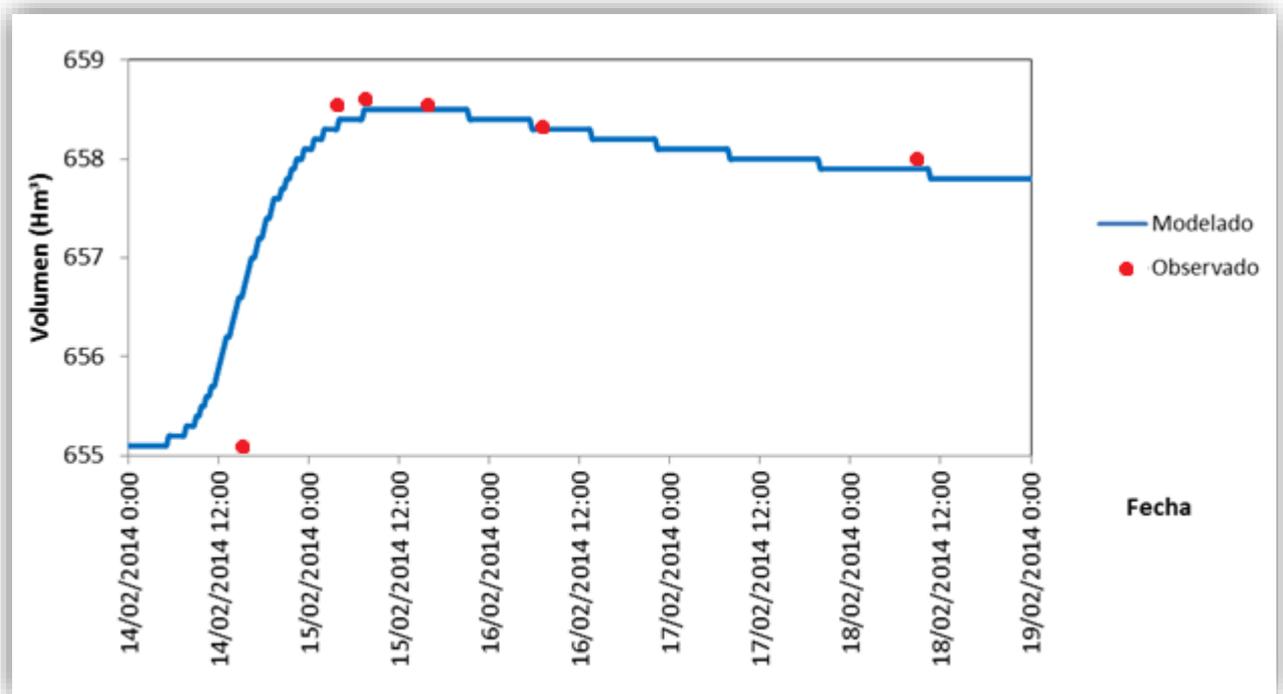


Figura 63: Variación de altura del embalse río Tercero.

CAPÍTULO IV – Calibración del modelo hidrológico para reconstruir el evento extraordinario del 14 de febrero de 2014

Finalmente se compara el hidrograma de salida del vertedero del embalse río Tercero modelado con el medido durante el evento (figura 64). Se puede observar una muy buena correspondencia entre ambos hidrogramas.

El caudal máximo calculado a través de HEC-HMS es de 392.2 m³/s, mientras que el caudal máximo observado por las autoridades provinciales fue de 445.5 m³/s con una diferencia de dos horas entre picos, valor que consideramos adecuado dado que no se conoce con precisión como estuvo distribuida temporalmente la lluvia. Esto representa una variación del 12% entre los caudales pico por lo que la modelación realizada con HEC-HMS nos permitió obtener valores con un alto grado de exactitud respecto a los medidos durante el evento, así el modelo calibrado puede ser utilizado para obtener información acerca del comportamiento de la cuenca frente a diferentes eventos, no así frente a un tren de eventos.

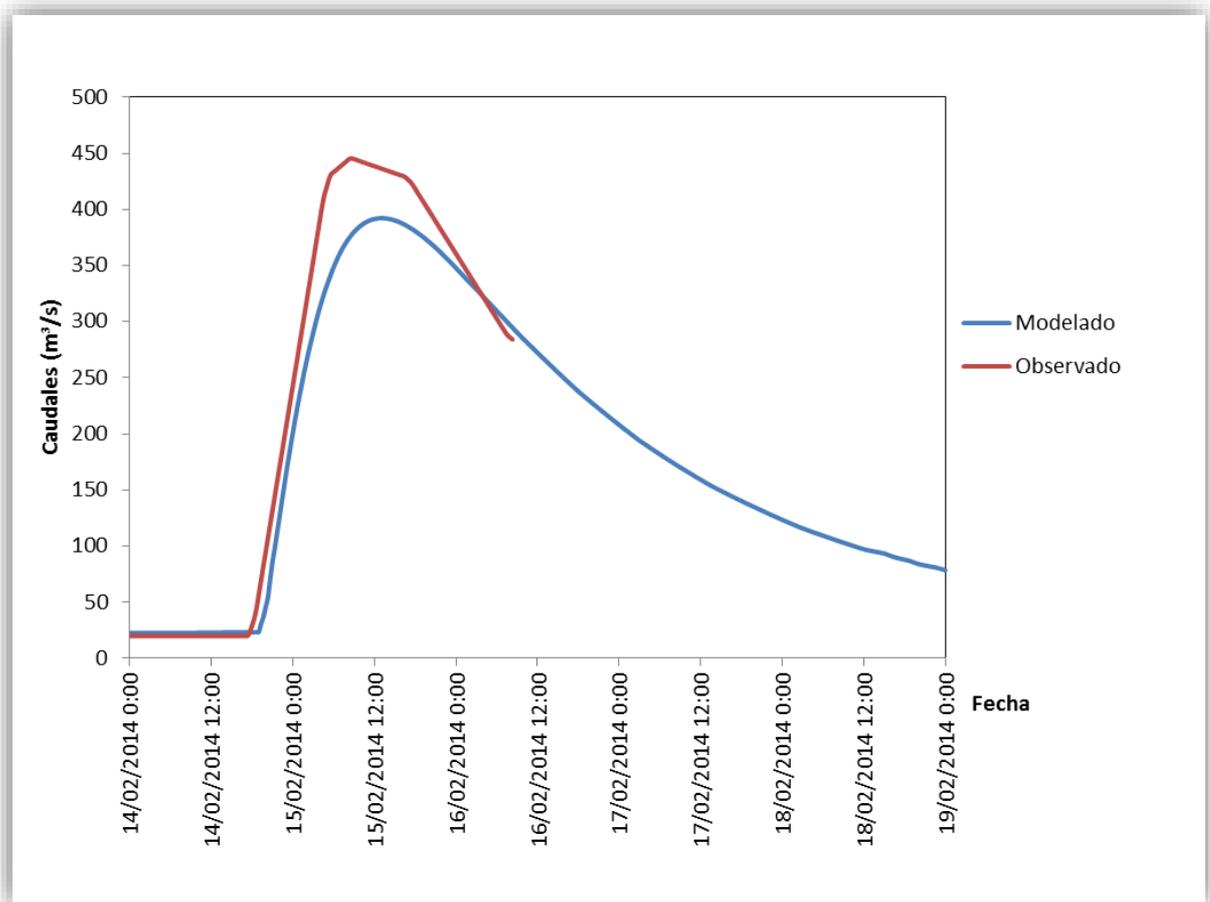
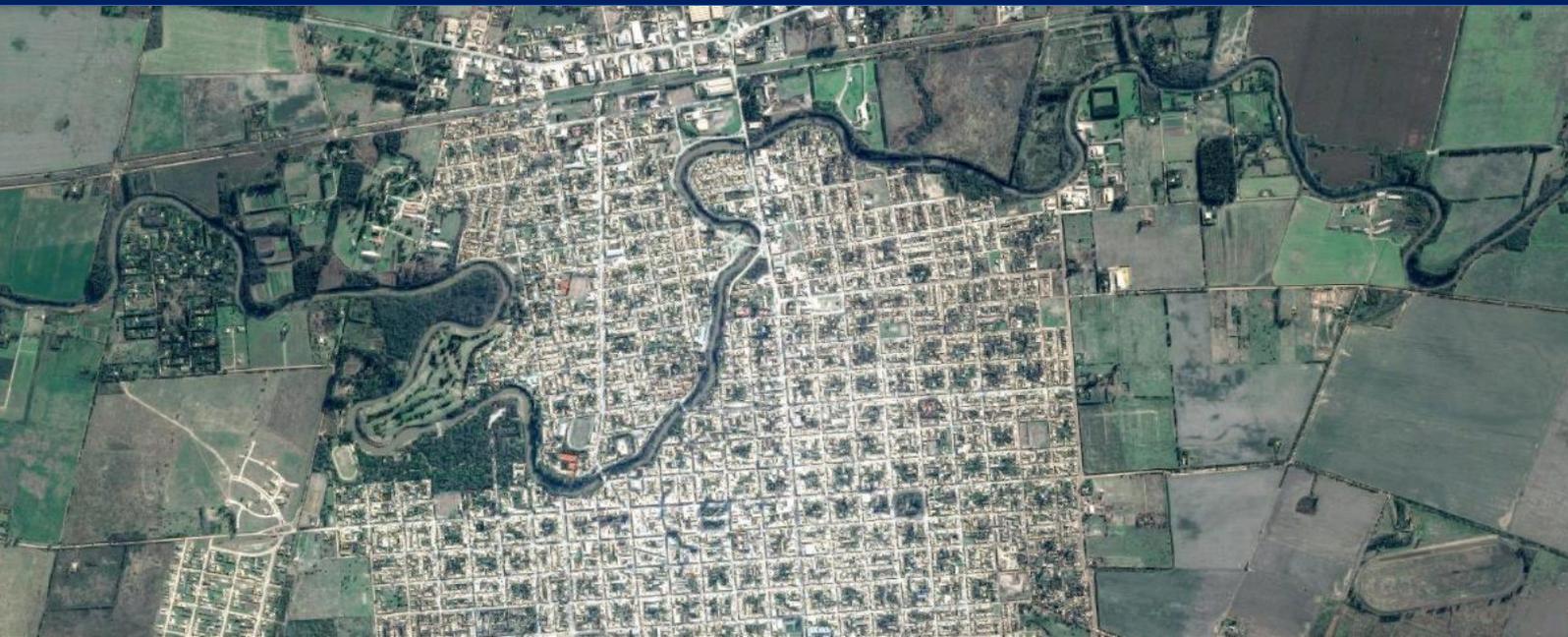


Figura 64: Hidrogramas de salida modelado y observado del embalse Río Tercero.

Capítulo V



**Elaboración de un modelo
hidráulico para la
reconstrucción de los mapas
de inundación de la ciudad
de Bell Ville en los meses de
marzo y abril de 2014**

Capítulo V: Elaboración de un modelo hidráulico para reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

5.1 Introducción.

Luego de los acontecimientos de desborde del río ocurridos en el año 2014 en las localidades que se encuentran aguas abajo del embalse Río Tercero, principalmente Villa María, Ballesteros y Bell Ville, fue necesario tomar mayor conocimiento de los niveles de inundación alcanzados por el agua para que de este modo, los organismos de gestión puedan tomar las medidas necesarias.

En este capítulo se elabora un modelo hidráulico de la localidad de Bell Ville con el objetivo de poder simular los niveles obtenidos para diferentes condiciones de caudal. Para ello es necesario calibrar el modelo hidráulico efectuado. Dicha calibración fue llevada a cabo utilizando datos del evento de crecida de marzo-abril de 2014.

Para realizar la modelación hidráulica se utilizó el programa HEC-RAS. Se partió de un modelo existente suministrado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, y mejorado por el autor de este trabajo. En este capítulo se describe también los distintos parámetros hidráulicos utilizados en el modelo, que comprende el “n” de Manning y las áreas de flujo inefectivo. Posteriormente se presentarán las condiciones de borde, y finalmente, se describirá el modelo obtenido.

5.2 Modelo hidrológico provisto por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba.

La Secretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba proveyó al Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba la información topográfica del tramo urbano del río Tercero (Ctalamochita) que se encuentra en la localidad de Bell Ville (figura 65). Este tramo cuenta con una longitud de 8290 metros con secciones relevadas cada 50 metros y toda la infraestructura existente sobre el río.

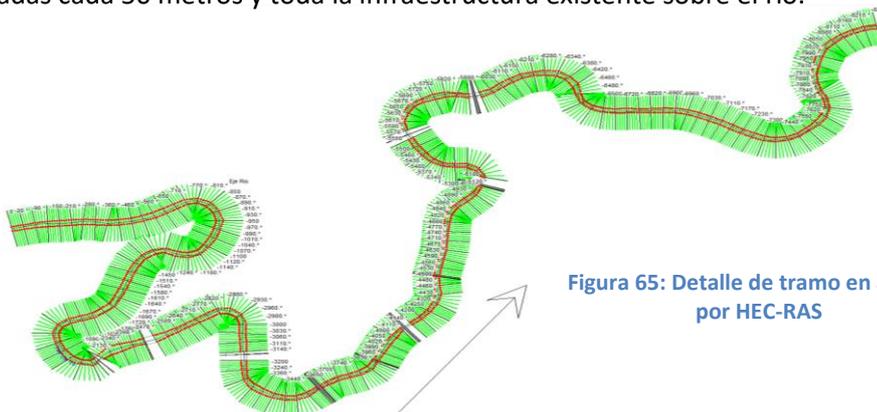


Figura 65: Detalle de tramo en análisis por HEC-RAS

CAPÍTULO V: Elaboración de un modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

5.3 Determinación de parámetros hidráulicos.

Para poder construir el modelo hidráulico HEC-RAS, fue necesario determinar los parámetros que tienen en cuenta la resistencia al flujo ("n" de Manning), las áreas inefectivas de escurrimiento y las condiciones borde. A continuación se procede a la obtención de los mismos para poder ingresarlos al modelo que se utilizará.

5.3.1 "n" de Manning.

La ecuación de Manning (ecuación 14), ampliamente utilizada a nivel ingenieril, es una de las tantas ecuaciones existentes para determinar la resistencia al flujo. La misma depende de la pendiente de energía (S_f), el radio hidráulico (R) y un parámetro de rugosidad conocido como "n" de Manning.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \text{ (Ecuación 14)}$$

Herrero, 2013, determinó a partir de mediciones de campo para el río Tercero (Ctalamochita) aguas arriba de la confluencia con el río Saladillo un valor de "n" de Manning de 0.029. En el presente trabajo, se adoptó un valor de 0.031 (el cual no difiere notablemente de lo reportado por Herrero, 2013) para el cauce principal y de 0.12 para las planicies de inundación, ya que las mismas cuentan con una gran densidad de vegetación, como puede observarse en la figura 66, correspondiente al río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Bell Ville.



Figura 66: Fotografía de río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Bell Ville

5.3.2 Áreas de flujo inefectivo.

Las áreas de flujo inefectivo son aquellas áreas que se encuentran inundadas, pero no contribuyen al escurrimiento, es decir, son zonas donde el flujo recircula o donde el agua se encuentra estancada. Estas áreas inefectivas se encuentran principalmente en los sectores de ingreso y egreso de alcantarillas o puentes, los cuales hacen que el flujo se contraiga y expanda. Para realizar correctamente el modelo hidráulico es necesario determinar estas áreas inefectivas de flujo.

CAPÍTULO V: Elaboración de un modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

La figura 67 muestra el criterio adoptado para determinar las áreas inefectivas de flujo en el presente trabajo, donde puede observarse que se toma una recta de pendiente 1:1 entre el extremo del obstáculo analizado y el borde del cauce, en el sector de contracción del flujo, mientras que en la expansión, la pendiente que demarca el área de flujo inefectivo es de 2:1.

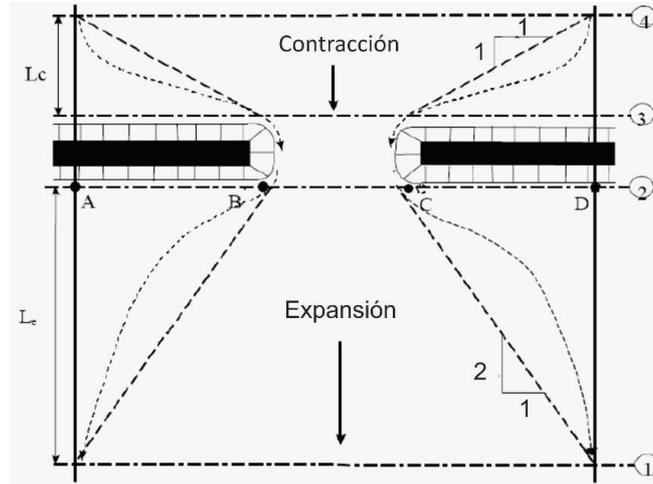


Figura 67: Detalle de áreas de flujo inefectivo

5.3.3 Condiciones de borde.

Finalmente, para poder construir el modelo, es necesario determinar las condiciones de borde. Una práctica común adoptada en ingeniería cuando no se conoce las condiciones de borde, es adoptar al flujo como uniforme. Esto genera errores importantes cuando en el borde el flujo no es uniforme, lo cual es común en áreas urbanas debido a los puentes y obstáculos presentes en el río.

En el caso de Bell Ville, Díaz Lozada (2014), determinó una curva altura-caudal (figura 68) para la sección ubicada en el puente Sturla de dicha localidad, la cual responde a la ecuación 15. En el presente estudio, se procedió a elegir como condición de borde un nivel que para determinado caudal, genera el nivel correspondiente a ese caudal reportado por la curva altura-caudal en el puente Sturla.

$$Q = 6.96(H - 1)^{1.67} \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde H (altura leída en la escala) debe ingresarse en metros, y el valor de Q (caudal) posee como unidad m^3/s .

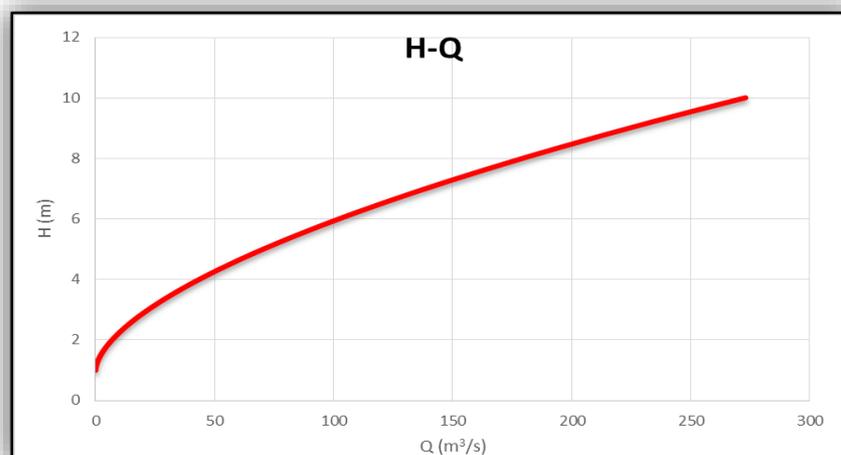


Figura 68: Curva H-Q de la sección en el puente Sturla

CAPÍTULO V: Elaboración de un modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

5.4 Descripción del modelo realizado HEC-RAS.

El modelo hidráulico HEC-RAS es un desarrollo del cuerpo de ingenieros de las fuerzas armadas de Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés), el cual está diseñado para realizar simulaciones hidráulicas a través de modelos numéricos que permiten realizar análisis de flujo permanente unidireccional gradualmente variado a superficie libre para los distintos caudales que se le pueden exigir (Cea y Bladé et al, 2008). Mediante este programa se puede realizar una primera aproximación para la ejecución de mapas de inundación.

Para el funcionamiento del mismo se deben aportar dos tipos de datos: datos geométricos fundamentales, los cuales se tratan de las secciones transversales a lo largo del cauce considerado. Dichas secciones se introducen mediante la cota de varios puntos que previamente hayan sido relevadas topográficamente, y el algoritmo calcula la pendiente del cauce mediante los datos de dos secciones contiguas. El otro tipo de dato que se debe suministrar son parámetros hidráulicos ("n" de Manning, condiciones de borde, áreas de flujo inefectivo, etc) y el parámetro hidrológico del caudal que puede ser un valor constante (flujo permanente), o variable en el tiempo (flujo impermanente).

A este modelo de una longitud de 8290 metros, donde fueron relevadas secciones cada 50 metros, se le realizaron una serie de modificaciones para representar las condiciones de flujo observadas en campo, las cuales se tratan de modificaciones en la selección de tramos para el estudio, la colocación de pilas de puentes existentes, modificación de las condiciones de borde, la colocación de las áreas inefectivas de flujo y la interpolación de secciones para modelar correctamente las expansiones y contracciones del flujo.

En la figura 69 puede observarse el modelo llevado a cabo en el área urbana de Bell Ville.



Figura 69: Modelo hidráulico del río Tercero (Ctalamochita), sección Bell Ville proyectado en imagen satelital de la ciudad de Bell Ville.

Capítulo VI



**Calibración y resultados
obtenidos del modelo
hidráulico para la
reconstrucción de los mapas
de inundación de la ciudad de
Bell Ville en los meses de
marzo – abril de 2014**

Capítulo VI: Calibración y resultados obtenidos del modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en el mes de Marzo de 2014

6.1 Introducción.

Una vez construido el modelo hidráulico HEC-RAS para la sección del río Tercero (Ctalamochita) que atraviesa la ciudad de Bell Ville, se procedió a la calibración del mismo a partir de las condiciones existentes en el río los días 5 de marzo, 6 de marzo, 8 de abril y 10 de junio de 2014. Siendo el día 5 de Marzo el de mayor importancia ya que se desarrolló un evento extraordinario con un caudal circulante de 256.66 m³/s.

Para realizar esta calibración, se utilizaron los datos de caudales, cota de superficie libre del puente Sturla y cota de superficie libre del puente Sarmiento, obtenidas por Díaz Lozada (2014).

Dado que la última sección modelada no coincide con la sección del puente Sturla (la cual es la última sección con datos de nivel), se realizó un proceso iterativo donde se determinó el nivel de superficie libre de la última sección de forma tal de obtener en los niveles medidos en el puente Sturla. Los niveles medidos en el puente Sarmiento sirvieron de verificación.

De esta manera, mediante la calibración del modelo se logra tener una herramienta que permite determinar los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville durante los acontecimientos de marzo de 2014, así como también simular diferentes escenarios que sirven de apoyo para la toma de decisiones en cuanto a líneas de ribera, protecciones, etc.

6.2 Condiciones existentes en el Río Tercero (Ctalamochita).

Para la calibración del modelo se utilizaron mediciones realizadas por el equipo de trabajo del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) durante los días 5 de marzo, 6 de marzo, 8 de abril y 10 de junio de 2014.

Se tomaron tres datos en consideración, los caudales, cota de superficie libre del puente Sturla y cota de superficie libre del puente Sarmiento (tabla 66) dichos niveles fueron relevados en campo.

CAPÍTULO VI: Calibración y resultados obtenidos del modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

Tabla 66: Caudales y cota sup. libre de puentes Sturla y Sarmiento.

Condición de flujo	Fecha	Caudal [m ³ /s]	Cota sup. libre (Puente Sturla) [msnm]	Cota sup. libre (Puente Sarmiento) [msnm]
1	05/03/2014	256.66	126.78	127.10
2	06/03/2014	245.62	126.66	127.04
3	08/04/2014	112.85	123.04	123.60
4	10/06/2014	29.11	120.40	120.93

6.3 Calibración del modelo hidráulico.

Partiendo del modelo construido en el capítulo precedente, se calibra el modelo hidráulico HEC-RAS utilizando los caudales y niveles de superficie libre en el puente Sturla, debiendo coincidir los valores modelados con los valores observados. Finalmente la cota de superficie libre del puente Sarmiento observada y calculada por HEC-RAS sirve de verificación de la calibración de los parámetros del modelo.

Los datos finales de la calibración se presentan en la tabla 67 a continuación, donde las variaciones en el puente Sarmiento entre los valores modelados y observados son incrementos menores al 1% para caudales elevados, por lo que se puede dar por calibrado el modelo.

Tabla 67: Cotas sup. libre observadas y modeladas de puentes Sturla y Sarmiento

Condición de flujo	Caudal [m ³ /s]	Cota sup. libre (Puente Sturla)	Con HEC-RAS (Puente Sturla)	Cota sup. libre (Puente Sarmiento)	Con HEC-RAS (Puente Sarmiento)	Valor de Downstream
1	256.66	126.78	126.78	127.10	127.16	126.61
2	245.62	126.66	126.66	127.04	127.03	126.50
3	112.85	123.04	123.04	123.60	123.46	122.86
4	29.11	120.40	120.40	120.93	120.78	120.31

6.4 Resultados obtenidos y mapa de inundación.

Luego de obtenido y calibrado el modelo hidráulico HEC-RAS, se procedió a ejecutar el mismo para determinar el mapa de inundación para el caudal máximo medido de 256.66 m³/s y obtener la altura en cada una de las secciones de control, las cuales se detallan en la tabla 68.

Tabla 68: Alturas de pelo libre en las secciones de control para caudal máximo

Caudal (m ³ /s)	Sitio				
	Puente Sturla	Puente Sarmiento	Azud	Curva A	Sector Bomba
	Altura (msnm)	Altura (msnm)	Altura (msnm)	Altura (msnm)	Altura (msnm)
256.66	126.78	127.16	127.45	127.80	126.88
Fondo de cauce (m)	117.59	118.94	121.50	121.01	117.83

CAPÍTULO VI: Calibración y resultados obtenidos del modelo hidráulico para la reconstrucción de los mapas de inundación de la ciudad de Bell Ville en los meses de marzo y abril de 2014

Luego, con los datos obtenidos de la modelación, se obtuvo el mapa de inundación de la localidad de Bell Ville para el tramo del río en estudio. En la figura 70 puede observarse la imagen satelital de la localidad con la cota de inundación para el día 05 de marzo de 2014, donde se produjo el evento de mayor dimensión. Aquí puede verse gráficamente las zonas más afectadas con una serie de flechas rojas, las cuales indican que el agua puede sobrepasar los límites demarcados, ya que no se cuenta con los datos topográficos más allá de dichos puntos.

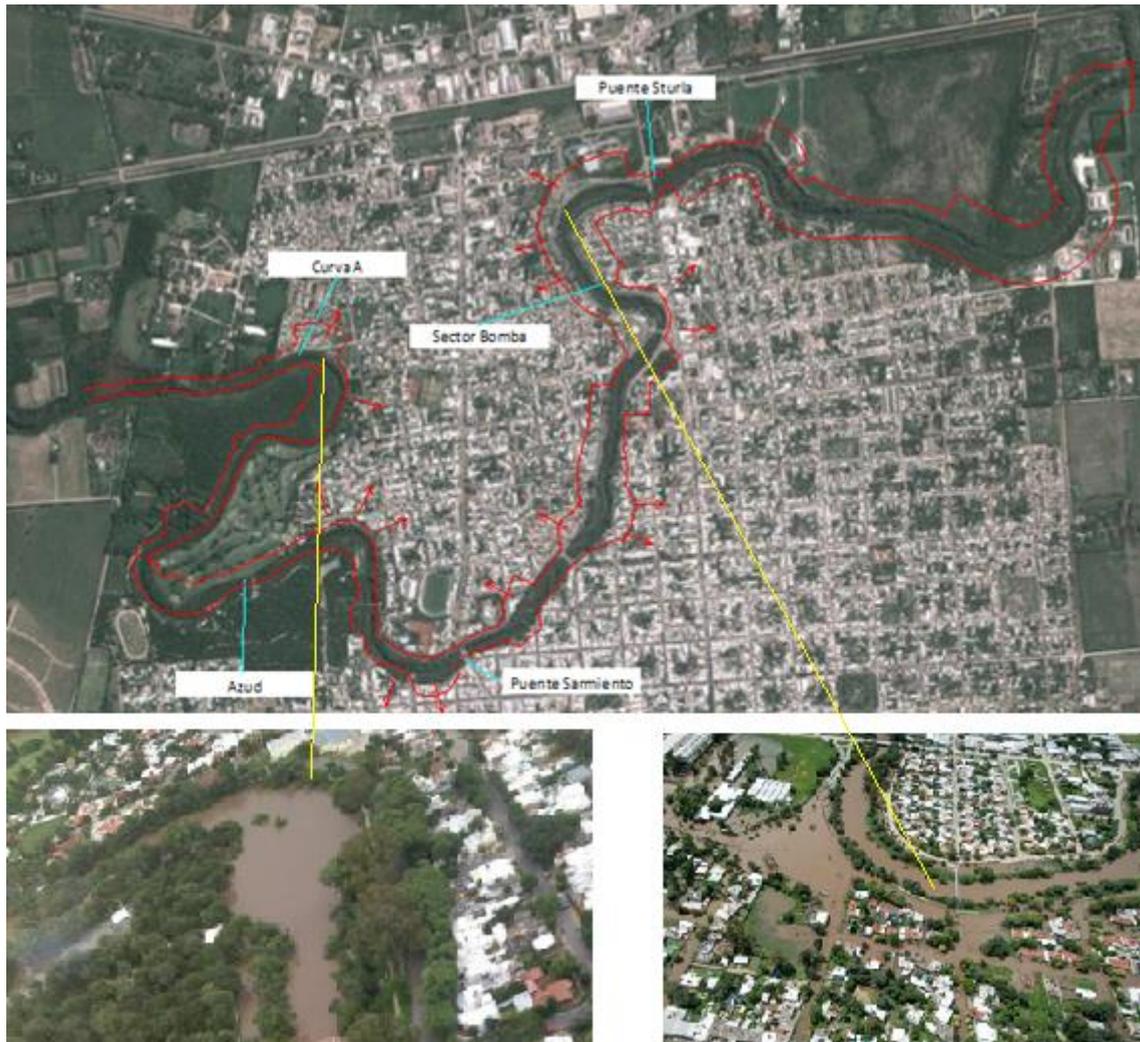


Figura 70: Mapa de inundación de la localidad de Bell Ville

Capítulo VII



**Conclusiones y
recomendaciones**

Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones.

I. A partir de la búsqueda de antecedentes se pudo recopilar una gran cantidad de información respecto de la cuenca de estudio. Dichos trabajos previos analizan principalmente la cuenca baja y se refieren al estudio de caudales ambientales, calidad de agua, cuantificación de caudales, etc. Con respecto a la cuenca alta, en la temática referida a esta práctica, se encontró una modelación hidrológica del río Santa Rosa realizada por INA-CIRSA utilizando el modelo desarrollado por Bertoni, 2000. No se ha encontrado en la bibliografía ningún estudio antecedente donde se realizó una modelación hidrológica de la cuenca alta de manera completa, lo cual deja un área de vacancia que es objeto de esta práctica. Con respecto a modelaciones hidráulicas, el gobierno de la provincia poseía un modelo hidráulico del tramo urbano de Bell Ville, pero dicho modelo requería ser mejorado y calibrado para representar adecuadamente las condiciones observadas durante el evento de crecida del 2014.

II. Durante la caracterización de la cuenca fue de gran importancia la visita a campo para tomar conocimiento de los caudales que aporta cada río al embalse, las características de los mismos, la cobertura vegetal y características fisiográficas y topográficas de la cuenca. La información obtenida de la visita permitió comprender adecuadamente la problemática, tener un conocimiento más amplio del área de estudio y posteriormente permitió validar la información mediante las diferentes herramientas informáticas.

Los programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) combinados con un modelo digital de terreno SRTM que utiliza una resolución de 90m x 90m permitieron obtener la red de escurrimiento y delimitación de la cuenca y subcuencas de la misma con gran precisión. Esta resolución utilizada de SRTM fue adecuada para el trabajo que se llevó a cabo debido a que la cuenca de estudio es una cuenca de montaña y los valores obtenidos tienen gran concordancia con los observados en campo. Únicamente se observaron algunas falencias en el trazado de la red de escurrimiento, las cuales fueron corregidas manualmente.

Para determinar la cobertura vegetal se efectuaron mapas del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat 8, correspondientes al mes de octubre ya que en el mes de febrero (mes que ocurrió el evento) la imagen contenía un alto porcentaje de nubes. Los mapas de NDVI obtenidos representan adecuadamente las características de la cobertura vegetal observadas en campo. Para mayor facilidad en la interpretación de la información y luego su posterior correlación el número CN se generó una nueva clasificación basada en el NDVI (con valores de 0 a 100), llamado en este trabajo NDVI reclasificado, donde se tomaron los valores comprendidos entre el 1 y el 50, ya que los valores superiores corresponden al agua y son descartados debido a que no intervienen en el cálculo de los parámetros hidrológicos.

Finalmente se determinó el tiempo de concentración utilizando formulas empíricas debido a la gran cantidad de información necesaria que requieren los otros métodos

(mediante datos observados o mediante el enfoque físico cinemático), la cual no está disponible. El método racional generalizado y el método del SCS fueron los que arrojaron los resultados más adecuados a las características de la cuenca de estudio, usando como parámetro de comparación el tiempo obtenido a partir de la velocidad media de ríos de montaña en crecida (3 a 4 m/s) dividido la longitud del cauce. Los valores obtenidos por ambas fórmulas fueron posteriormente promediados para obtener el valor del tiempo de concentración a utilizar en el modelo. Estos valores van desde las 1.64 horas de la subcuenca 7 del río Grande hasta las 9.66 horas de la subcuenca 3 del río Quillín.

- III. Para la elaboración del modelo hidrológico se utilizó un modelo HEC-HMS debido a que es ampliamente utilizado por su sencillez y robustez y permite simular el proceso de precipitación-escorrentía en múltiples cuencas. Para ello se determinan los parámetros hidrológicos, en primer lugar se determinó la infiltración a través del método de CN de la SCS ya que el mismo es de sencillez de aplicación, de amplia difusión y posee un bajo requerimiento de información, ya que puede ser obtenido a partir de los mapas de NDVI, y ponderando de acuerdo al área de cada cobertura vegetal.

El segundo parámetro hidrológico fue el valor “k” de Clark, dicho parámetro fue necesario determinar ya que se utilizó el hidrograma unitario sintético de Clark (debido a la falta de información de caudales y precipitación con gran resolución espacial y temporal para generar hidrograma unitario propio de la cuenca), que es adecuado para el tamaño de cuenca con el que se ha trabajado en esta práctica. Este parámetro puede ser calculado a partir de una fórmula empírica que indica el valor de k es igual al 75% del tiempo de concentración. Este valor empírico no varió en gran medida respecto al valor calibrado (diferencia porcentual máxima de un incremento del 29%). Dada la gran variación que tienen los parámetros hidrológicos estimados respecto de los reales, una diferencia máxima de un incremento del 29% entre el valor estimado con la ecuación empírica y el calibrado indica que la fórmula utilizada da una buena aproximación para el tipo de cuenca estudiado.

Finalmente para la obtención de la precipitación del 14 de febrero de 2014, se partió de datos de precipitaciones puntuales de estaciones pluviométricas provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (www.hidricos.gov.ar). Para la distribución espacial se seleccionó un área de escurrimiento efectivo, un sector de la cuenca de 2020.22km² en donde las precipitaciones registradas generan importantes escurrimientos en los distintos tributarios. Ya que en virtud de la experiencia adquirida por el grupo y observaciones realizadas por lugareños y diferentes organismos de gestión, las precipitaciones en la parte baja de la cuenca no generan aportes significativos. Esta área de escurrimiento efectivo fue la utilizada para obtener una precipitación media areal a través de polígonos de Thiessen, el cual es un método sencillo del que permite ponderar la información puntual y obtener una lámina areal uniformemente distribuida.

Una vez obtenida la precipitación media areal, se distribuyó temporalmente. La lluvia registrada tuvo una duración de 12 hs según informes oficiales (Informe del MAAySP, 2014). Debido a la falta de conocimiento acerca de cómo se distribuyó la lluvia en esas 12 horas (dado que la información pluviométrica es diaria y se supone que el valor reportado pertenece a esas 12 horas), se seleccionó el hidrograma sintético de la estación La Suela determinada con el método de Huff que se encuentra cercana a la cuenca de estudio y presenta características similares.

De esta manera se obtuvo un modelo hidrológico integral HEC-HMS representativo de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) con un área de 3238km² dividida en 22

subcuencas, con 5 ríos principales (Santa Rosa, Amboy, Grande, Quillinzo y La Cruz) y tres embalses (Cerro Pelado, Arroyo Corto y Río Tercero) que permite obtener una transformación lluvia-caudal de eventos producidos en la cuenca, aunque debió ser calibrado mediante información de campo.

IV. Para poder utilizar el modelo se debió calibrar el mismo utilizando condiciones existentes en la cuenca el 14 de febrero de 2014, estas condiciones eran la de precipitación, donde por Thiessen se determinó una lámina areal de 204.68 mm distribuida según un hietograma sintético calibrado para la cuenca de la Suela con el método de Huff.

Otra condición existente de gran importancia fue la de los embalses del sistema del río Grande, donde por falta de información se determinó que los embalses Cerrado Pelado y Arroyo Corto se encuentran en su cota de vertedero, ya que por formar parte de un sistema de turbinado y bombeo y debido a la baja capacidad de almacenaje del embalse Arroyo Corto es una buena aproximación la hipótesis adoptada. El tercer embalse del sistema es el de río Tercero, su información fue obtenida del gobierno provincial que aportó las cotas del embalse durante el evento (655.11 msnm, 2.39 m por debajo de la cota de vertedero, al momento de producirse el evento) y el hidrograma de salida del vertedero para dicho evento que se utilizó para calibrar los parámetros de CN y "k" de Clark.

Con los valores obtenidos, para calibrar el modelo se utilizó las herramientas de ajuste de HEC-HMS obteniéndose con esta herramienta resultados satisfactorios respecto a los valores observados en el hidrograma de salida del embalse Río Tercero. También se pudo concluir que los valores de CN y "k" de Clark calculados en capítulos precedentes fueron una buena aproximación ya que se obtuvo una variación máxima de CN de +/- 6.6 puntos y una variación máxima relativa de un incremento del 29% para el "k" de Clark.

Una vez calibrado el modelo el mismo proveyó una gran cantidad de datos, uno resultado de gran importancia es el caudal pico de ingreso al embalse, siendo el río de mayor aporte el Quillinzo, con un pico de 1304.2 m³/s. El pico máximo total de ingreso al embalse fue de 2907.6 m³/s. Este elevado caudal de agua ingresando al embalse produjo un aumento volumétrico del mismo de 153.65 Hm³ (según modelo), 158.14 Hm³ (valor medido), un 34% mayor al volumen inicial, para alcanzar los 610.05 Hm³ de volumen máximo modelado, lo cual representa una variación menor al 1% respecto al volumen máximo medido durante el evento (614.08 Hm³), dando una buena correspondencia entre lo modelado y lo medido.

Caso similar ocurre con los niveles del embalse, donde el valor máximo modelado y el valor máximo medido son coincidentes (658.6 m.s.n.m.).

Finalmente el hidrograma de salida del embalse Río Tercero arroja un caudal máximo de 392.2 m³/s, mientras que el caudal máximo observado por las autoridades provinciales fue de 445.5 m³/s con una diferencia de dos horas entre picos, valor que consideramos adecuado dado que no se conoce con precisión como estuvo distribuida temporalmente la lluvia. Esto representa una variación del 12% entre los caudales pico modelado y observado y una buena correspondencia general entre los dos hidrogramas. De esta manera se obtuvo un modelo calibrado para realizar simulaciones de diferentes escenarios posibles y proveer de una herramienta importante para que las autoridades de gestión tomen medidas estructurales y no estructurales a futuro.

Si se comparan los picos de caudal de ingreso y egreso del embalse, puede observarse la importante laminación que produjo el mismo, una reducción del pico en un factor de 7.

- V. Ante las inundaciones registradas en la ciudad de Bell Ville en marzo-abril de 2014 fue necesario realizar un modelo hidráulico a través de HEC-RAS, ya que contando con la información topográfica del cauce se pudieron obtener los mapas de inundación con gran exactitud. La información topográfica fue provista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba. En adición se debió considerar un parámetro de resistencia al flujo donde se utilizó la ecuación de Manning ya que es ampliamente utilizada a nivel ingenieril, obteniendo buenos resultados. Para la cobertura vegetal de este cauce una buena aproximación es un valor promedio de 0.031 y de 0.12 para las planicies de inundación.
- VI. Es necesaria una buena información topográfica, con perfiles espaciados lo suficientemente para obtener la información necesaria al menor costo posible. En el modelo presentado en esta práctica, se tenían perfiles cada 50 m los cuales permitieron obtener la información requerida para realizar correctamente la modelación.
- VII. Para poder utilizar este modelo se debió calibrar con las condiciones de borde existentes en eventos de marzo, abril y junio de 2014.
- Al ser un flujo no uniforme y no contar con las condiciones en los extremos se procedió a elegir como condición de borde un nivel que para determinado caudal, genera el nivel correspondiente a ese caudal reportado por la curva altura-caudal en el puente Sturla y se utiliza la cota de superficie libre del puente Sarmiento observada y modelada por HEC-RAS como calibración de los parámetros del modelo, donde se registró una variación porcentual menor al 1% para caudales elevados. Así se obtuvo un mapa de inundación similar al verificado en imágenes del evento estudiado.
- De esta manera se posee un modelo calibrado para realizar simulaciones hidráulicas de diferentes escenarios y proveer de una herramienta importante para que las autoridades de gestión tomen medidas estructurales y no estructurales a futuro en base a los mapas de inundación.

7.2 Conclusión personal.

La práctica profesional supervisada de nuestra casa de estudios proporciona una importante herramienta para todo estudiante de ingeniería civil en el final de su carrera ya que permite adquirir una experiencia laboral en la que uno puede poner a prueba todos los conocimientos teóricos adquiridos durante la carrera, en conjunto con ingenieros profesionales que permiten desarrollar estos conocimientos e integrándolos con el objetivo de desarrollar un proyecto específico y real.

Esto presenta un desafío al encontrarse con dificultades particulares del proyecto y donde se deben tomar decisiones que afectaran al proyecto de ese punto en adelante. A esto se le suma la necesidad de trabajar en equipo no solo con otros ingenieros civiles, sino que también con profesionales de otras áreas, entidades gubernamentales y no gubernamentales. De esta manera se dan los primeros pasos en el ámbito laboral, el cual será de constante aprendizaje.

Académicamente permitió desarrollar conocimientos en el manejo de herramientas informáticas e interrelacionar los conocimientos adquiridos durante la carrera de hidrología, hidráulica, mecánica de fluidos, ambiental y obras hidráulicas.

Por lo tanto puedo concluir que fue de gran ayuda a mi desarrollo como futuro ingeniero civil y espero con ansias continuar mi formación profesional en una carrera tan apasionante.

Referencias

- **Alonso, D. (2015).** “NDVI: Que es y cómo usarlo”. Artículo extraído de la página MappingGIS, de formación GIS y difusión tecnológica. (En: <http://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>)
- **Barchiesi, G.M. (2014).** “Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca del río Carcaraña”. Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFYN UNC. Córdoba, Argentina.
- **Bastidas, C. (2003).** “Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS”. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Venezuela.
- **Bedogni, M.D. (2011).** “Determinación del Caudal Ecológico para el Río Tercero (Ctalamochita)”. Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFYN, UNC. Córdoba, Argentina.
- **Bertoni, J.C., Chevallier P., Bouvier, C., Desbordes, M. (2000).** “Análisis relativo a la estimación del tiempo de concentración: Aplicación a tres cuencas semi urbanizadas de la región central de argentina”. Trabajo para el XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica Córdoba 2000.
- **Caamaño Nelli G., Rico A., Dasso C., García C.M. (2000).** “Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de lluvias máximas: una versión simplificada del modelo DIT”. Desarrollo y aplicaciones sobre lluvias de diseño en Argentina. Córdoba, Argentina.
- **Cea, L., Blade, E. (2008).** “Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable”. Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial. Madrid
- **Chow, V.T., Maidment D.R., Mays, L.W. (1994).** “Hidrología Aplicada”. McGRAW-HILL
- **Dasso C., Caamaño Nelli G., Ganancias F., Colladon L. (2007).** “Atenuación espacial de Lluvias de Diseño para la cuenca del río Santa Rosa, Córdoba, Argentina”. Desarrollo y aplicaciones sobre lluvias de diseño en Argentina. Córdoba, Argentina.
- **Díaz Lozada, J.M. (2014).** “Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en el sistema pluvial del río Carcarañá”. Trabajo final de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería: Mención en recursos hídricos.
- **Freiría J.M. (2014).** “Modelación hidrológica de la cuenca Centro-Este del Departamento San Justo para la Sistematización de Excedentes Hídricos”. Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFYN, UNC. Córdoba, Argentina.
- **Havrylenko S.B., Damiano F., Pizarro M.J. (2012)** “Estimación del número de curva en la cuenca del Río Arrecifes (Provincia de Buenos aires)” INTA. (En: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_cat_2012_havrylenko_et_al.pdf)
- **Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos (2015),** “NOTA N° 196/14”, 15 de diciembre de 2014.

- **Moreyra, F. (2008).** "Aspectos medioambientales de la cuenca del Río Tercero y su relación con la calidad del agua". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFN UNC. Córdoba, Argentina.
- **NASA/JPL-Caltech/National Geospatial Intelligence Agency (2014).** "U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data" (En: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)
- **Ramírez L., Maritza C. (2003).** "Hidrología Aplicada". Trabajo de ascenso. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Venezuela.
- **Saldaño, V. (2010).** "Modelación Hidrológica y de Calidad de Agua del Río Tercero (Ctalamochita)". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFN UNC. Córdoba, Argentina.
- **Sánchez, F. J. (2011).** "Hidrograma unitario de Clark" Universidad de Salamanca. (En: <http://hidrologia.usal.es>).

MODELACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CTALAMOCHITA PARA EL MANEJO DEL EMBALSE DE RIO TERCERO

Sanchez Conci¹, Gastón, Bas, Luis¹, García, C.M^{1,2} y Díaz Lozada, J.M¹

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) – Universidad Nacional de Córdoba – Laboratorio de Hidráulica FCEfyN-UNC

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Introducción

La cuenca del Ctalamochita, (Tercero), posee una extensión de 9.580 km² desde sus nacientes en las Sierras de los Comechingones hasta la confluencia con el río Saladillo a partir del cual toma el nombre de río Carcarañá. La cuenca alta, se caracteriza por la influencia orográfica con importantes desniveles y la generación de caudales fluviales significativos, sobre esta se han realizado seis aprovechamientos, los cuales tienen por objeto, la generación hidroeléctrica, almacenamiento de agua, laminación de crecidas, entre otros. Estas obras han convertido a esta cuenca en la más regulada a nivel Provincial con una capacidad nominal de almacenamiento de 1000 Hm³. Durante el periodo comprendido en los años hidrológicos 2014-2015 se registraron en la cuenca precipitaciones severas que ocasionaron que el embalse de río Tercero superara su capacidad máxima de almacenamiento en poco tiempo y comenzara a erogar por vertedero produciendo la inundación de varias localidades ribereñas ubicadas aguas abajo entre las cuales se encuentran Bell Ville, Villa María y Ballesteros.

Un estudio antecedente (Díaz Lozada, et al 2016), muestra que el caudal máximo que puede escurrir por el río, sin generar inconvenientes, es de 200 m³/s. Para lograr esta erogación máxima se requiere un adecuado manejo de embalse, para lo cual se requiere información hidrológica de caudales, precipitaciones, etc. El presente artículo tiene como finalidad la presentación de la modelación hidrológica realizada sobre el evento del 14 de febrero de 2014 y de eventos hipotéticos de diseño con el objeto de servir de apoyo a las autoridades de gestión para la toma de decisiones respecto al manejo de embalse. Para la calibración del modelo se utilizaron datos de campo obtenidos durante el evento.

Metodología

Para cumplimentar con el objetivo propuesto se realizó un modelo conceptual con el paquete computacional HEC-HMS. El mismo modelo fue calibrado con datos de campo obtenidos durante el evento extraordinario (periodo de retorno mayor a 100 años según análisis estadístico de la lámina precipitada) de precipitación de la cuenca durante el mes de febrero del 2014. Los datos de campo provistos por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba consistieron en niveles de embalse y caudales erogados por vertedero, mientras que de la base de datos hidrológica de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación se obtuvieron los datos de precipitación. Para la conformación del modelo hidrológico se determinaron las 6 unidades hidrológicas que conforman el sistema que en su totalidad cuenta con una superficie total de aproximadamente 3238 km² (Santa Rosa, Amboy, Grande, Quillinzo, la Cruz y un área de aporte rural). Dichas unidades principales fueron subdivididas en 22 subcuencas. A partir de un modelo de elevación de terreno de libre disponibilidad (SRTM). Se definieron distintos usos del suelo, mediante la relación del índice NDVI (Índice de Vegetación Normalizada) con un valor de CN de acuerdo a

los valores propuestos por Chow, 1994 para cada tipo de suelo y su uso. La obtención del NDVI fue procesada digitalmente a través de información multispectral Landsat 8 correspondiente al mes de octubre de 2014. Los tiempos de concentración fueron definidos utilizando 5 formulas empíricas que pueden ser aplicadas en la cuenca de estudio a saber; Bransby-Williams, Método Racional Generalizado, Ecuación de Retardo del SCS, SCS y Dooge. De ellas solo se obtuvieron resultados razonables (de acuerdo a la experiencia del grupo y características de la cuenca) de dos ecuaciones: (a) Método Racional Generalizado y (b) SCS, siendo los mismos promediados para cada subcuenca. La transformación lluvia caudal se realizó mediante el hidrograma unitario de Clark. Dicho método de transformación requiere como parámetro un valor conocido como "K" de Clark el cual inicialmente se adoptó como el 75% del tiempo de concentración. La lámina de lluvia ocurrida durante el evento de calibración provino de estaciones pluviométricas; Cerro Blanco, El manzano, Lutti, Pampichuela, Yacanto y el Durazno. Dichos datos puntuales fueron ponderados mediante el empleo de polígonos de Thiessen en un área de precipitación efectiva de 2020,22 km². Dicha área se ubica en la zona alta de la cuenca (abarcando todo el sector de las altas cumbres cordobesas). El valor registrado por estos pluviómetros se supuso que precipito durante 12 horas, a pesar de que la información pluviométrica es diaria. (Dicha suposición se basa según lo dicho en el informe de la Secretaría de Recursos Hídricos de Cba, 2014, que indica que la lluvia que origina este evento tuvo esa duración). Debido a que se desconoce la distribución temporal de la lluvia se adoptó el hietograma sintético de la cuenca de La Suela obtenida por el método de Huff por Caamaño Nelli y Dasso, 2003. (La cuenca de la suela posee las mismas características fisiográficas e hidrológicas que la cuenca de estudio). Una vez construido el modelo se calibro el mismo con los datos de campo y se dio un ajuste final a los parámetros (CN y K de Clark) mediante las herramientas de ajuste de HEC-HMS. La diferencia máxima de valor de CN respecto del obtenido inicialmente fue de 6.6. En el caso de la cuenca rural el valor de CN fue modificado manualmente debido a que en el momento de procesar la imagen el suelo de la cuenca se encontraba descubierto debido a que se había realizado la cosecha. En el caso del "K" de Clark la diferencia porcentual máxima fue de 29%. Finalmente con el modelo calibrado se pudieron realizar simulaciones frente a diferentes niveles de cota de espera, precipitación y condición de humedad antecedente. En este caso la lámina de lluvia precipitada (se adoptó una duración 12 hs) fue obtenida de la IDF de los Reartes (Latitud -31.9167 Longitud -64.5833) y atenuada mediante un coeficiente de atenuación (CoDA). La distribución, en este caso, se realizó también con el hietograma de Huff para el río de la Suela.

Resultados

Mediante los datos de campo se calibro el modelo. Del evento del 14 de febrero (con cuyos datos fue calibrado el modelo) pudo conocerse que el volumen pico que ingreso al

embalse fue de 2907 m³/s (figura 1), este valor fue obtenido de la modelación. El caudal erogado por vertedero durante este evento fue de 392.2 m³/s (modelado) que difiere un 12 % respecto del reportado por las autoridades de 445.9 m³/s (figura 2). Puede observarse la importante atenuación realizada por el embalse que un cuyo momento poseía una cota de 655.11 msnm (657.5 msnm cota de vertedero). Con el modelo calibrado se comenzó a modelar los caudales de ingreso y egreso del embalse para diferentes condiciones de humedad antecedente, precipitaciones y niveles de embalse. Las precipitaciones modeladas se detallan en la tabla 1. En dicha tabla puede observarse que para precipitaciones mayores a 100 años, las mismas se nombran con el tiempo de retorno más un porcentaje. Esto se debe a que para precipitaciones mayores el tiempo de retorno obtenido no se correspondía con un valor razonable.

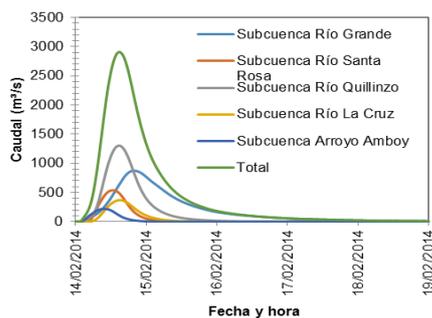


Figura 1.- Hidrogramas aportados por cada cuenca al embalse de Río Tercero

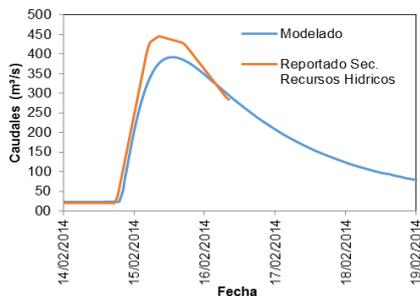


Figura 2.- Hidrogramas erogados por el vertedero del embalse de Río Tercero

Tabla 1.- Precipitaciones modeladas

	Lámina Puntual (mm)	Lámina Atenuada (mm)
25 años	131.16	87.27
50 años	142.66	94.92
100 años	153.80	102.34
100 años + 10%	169.18	112.57
100 años + 30 %	199.94	133.04
100 años + 60%	246.08	163.74
100 años + 100%	307.61	204.67

En la figura 3 se muestran los hidrogramas de ingreso al embalse que para la precipitación más severa modelada (100 años + 100%) que se corresponde con el evento de febrero de 2014. Si el mismo evento se diera con una condición de humedad antecedente CN III el pico de ingreso al embalse sería de 4403 m³/s. Para este caso el caudal erogado (figura 4), si el embalse se encontrase a cota 656.9 msnm, sería de 2328.7 m³/s (próximo a la capacidad máxima del vertedero). Para erogar menos de 200 m³/s es requerido en este caso una cota de 651.43 msnm.

Conclusiones

La cuenca alta del río Tercero es la más regulada de Provincia de Córdoba, dicha cuenca al igual que muchas cuencas del país se encuentra pobremente aforada. Los

eventos de crecidas sucedidos en 2014 y 2015 produjeron que las autoridades de gestión tomaran medidas sobre el manejo de embalse, para lo cual se requirió una mayor información hidrológica, de precipitación, etc. Dicho requerimiento de información dio origen al modelo explicado en este trabajo. Con respecto a los parámetros adoptados inicialmente (CN, K de Clark), el valor máximo de diferencia de CN inicial y ajustado fue 12.7. Dicha diferencia fue debido a un cambio en la vegetación de una subcuenca dado que la misma es explotada ruralmente. En el resto las cuencas, la variación máxima fue de 6,6. A pesar de que los resultados de caudal escurridos son sensibles al parámetro CN, se consideró adecuada la metodología adoptada frente a la falta de datos de infiltración del suelo. Con respecto al valor de K de Clark la diferencia máxima fue 29% respecto del adoptado inicialmente, lo cual es una buena aproximación adoptar inicialmente $K=0,75T_c$ (T_c : Tiempo de concentración). Los resultados obtenidos de la modelación permiten determinar qué nivel de embalse es adecuado tener disponible para almacenar una crecida asociada a una determinada recurrencia. Se observa que si el evento del 14 de febrero de 2016 se hubiese dado en condiciones de humedad antecedente CNIII y con el embalse a una cota de 656.9 msnm la erogación por vertedero hubiese alcanzado un caudal próximo el caudal de diseño del vertedero (3000 m³/s). El manejo de embalse es una tarea compleja que requiere más información que la que puede aportar el modelo generado, pero el mismo permite simular diferentes condiciones de precipitaciones, humedad del suelo y nivel de embalse que permiten generar información de soporte para la toma de decisiones por parte de las autoridades de gestión.

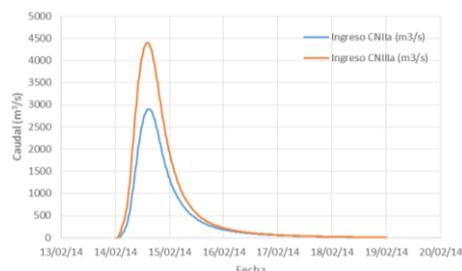


Figura 3.- Hidrogramas totales aportados al embalse de río Tercero por la condición 100 años + 100% con valores de CNII y CNIII

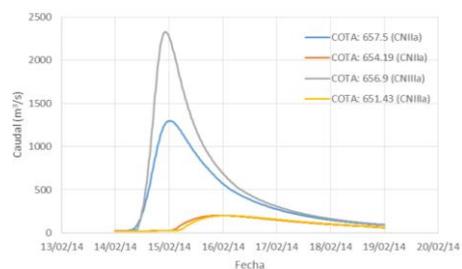


Figura 4.- Hidrogramas erogados por el vertedero del embalse de Río Tercero

Referencias Bibliográficas

- Caamaño Nelli, G., & Dasso, C. M. (2003). "Lluvias de diseño". *Universitos, Córdoba*.
- Díaz Lozada, J. M.; García, C. M.; Herrero, H., Heredia, A. Lopez, F., Castelló, E.y Brarda, J. P. (2016) "Caracterización experimental y numérica de eventos de crecida extraordinarios en la cuenca del Río Carcarañá, Argentina".
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). "Hidrología aplicada". Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A..
- Secretaría de Recursos Hídricos de Ceba (2014), informe de las operaciones realizadas durante el evento de crecidas del año 2014.