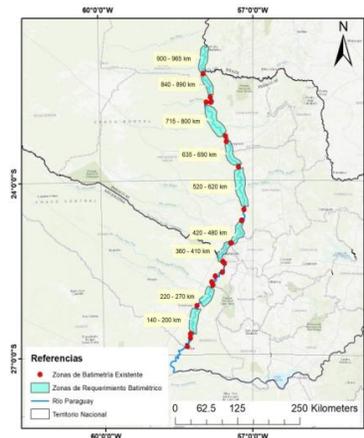
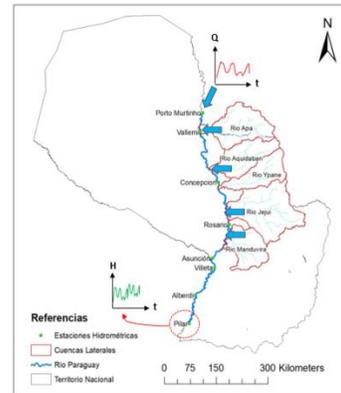
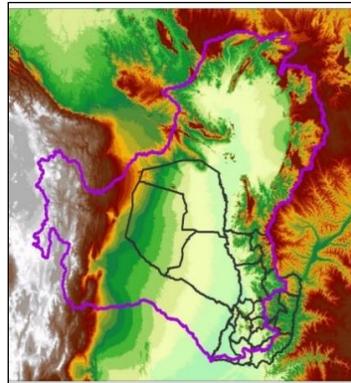
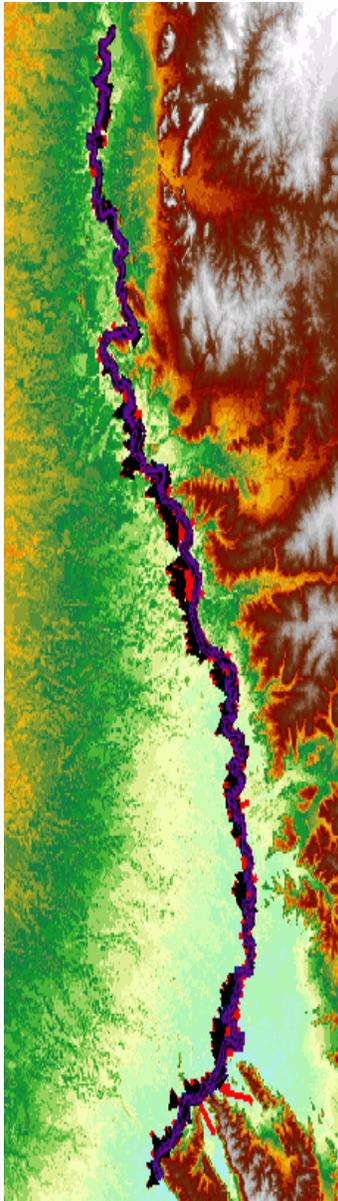


## SISTEMA DE PRONÓSTICO DE CAUDALES Y NIVELES DEL RIO PARAGUAY Y SU CUENCA

### INFORME FINAL

Centro de Tecnología Aplicada - Facultad de Ciencias y Tecnología  
Universidad Católica de Asunción, Paraguay



## 14-INV-280 – CONACYT-UC SISTEMA DE PRONÓSTICO DE CAUDALES Y NIVELES DEL RIO PARAGUAY Y SU CUENCA

Equipo de Investigación

Roger Monte Domecq, José Luis Ávila, Julián Báez, Roberto Takahashi, Daniel Vázquez, Alberto Grisetti, Benito Pereira, Manuel Mazó, Rosa Aseretto, Olga Orihuela, Ever Barreto y Daniel Bernal

Año 2020

1.	INTRODUCCIÓN .....	10
1.1.	Justificación.....	12
1.2.	Objetivos.....	12
1.3.	Resultados esperados.....	13
1.4.	Organización del estudio .....	13
2.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
2.1.	Revisión Metodológica .....	15
2.1.1.	Modelos Estocásticos .....	20
2.1.2.	Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos.....	22
2.2.	Antecedentes de previsión del río en el Paraguay .....	23
2.2.1.	Modelos Estocásticos utilizados para predecir niveles hidrométricos del río Paraguay .....	23
2.2.2.	Estudio de Crecidas del Rio Paraguay.....	23
2.2.3.	Pronóstico preliminar del Rio Paraguay-D. Rojo-Univ. Nacional de Colombia .....	24
2.2.4.	Pronósticos Rio Paraguay del Centro Meteorológico Nacional (DMH-DINAC).....	25
2.2.5.	Ajuste estadístico de alturas hidrométricas río Paraguay. Ing. J. L. Benza, Fiuna 1998.....	25
2.3.	Montaje modelo hidrodinámico río Paraguay y modelación hidrológica de cuencas de aporte ....	26
2.3.1.	Generalidades.....	26
2.3.2.	Área de Estudio.....	28
2.3.3.	Programa Utilizado .....	34
2.3.4.	Datos de elevación .....	36
2.3.5.	Datos de Tipo y Uso de Suelo .....	41
2.3.6.	Datos de Series de Tiempo .....	42
2.3.7.	Métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS .....	47
2.3.8.	Criterios utilizados para el montaje y puesta en marcha del Modelo Hidrodinámico .....	55
2.3.9.	Calibración .....	60
2.4.	Operacionalización de Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH) .....	62
2.4.1.	YRATO .....	62
2.4.2.	Acople y operacionalización de los modelos desarrollados .....	62
2.5.	Evaluación de modelos estocásticos para previsión de niveles del río Paraguay en Asunción .....	64
2.5.1.	Generalidades.....	64
2.5.2.	Alcance .....	64
2.5.3.	Análisis estadístico de la serie temporal de niveles de Asunción .....	67
3.	RESULTADOS.....	75
3.1.	Modelo hidrodinámico del río Paraguay y modelación hidrológica de cuencas de aporte .....	75
3.1.1.	Resultados de la modelación hidrológica .....	75
3.1.2.	Resultados Obtenidos en la Modelación Hidrodinámica .....	96

<b>3.2. Operacionalización de Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH) .....</b>	<b>104</b>
3.2.1. Componente HMS .....	104
3.2.2. Componente RAS.....	105
<b>3.3. Modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción . 106</b>	
3.3.1. Caso A .....	106
3.3.2. Caso B .....	112
3.3.3. Caso C .....	114
3.3.4. Caso D.....	119
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>122</b>
<b>4.1. Sistema de pronóstico de niveles del río Paraguay .....</b>	<b>122</b>
4.1.1. Modelos Hidrológicos .....	122
4.1.2. Modelo Hidrodinámico.....	123
4.1.3. Operacionalización del sistema sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH) .....	126
<b>4.2. Previsión de niveles del río Paraguay en Asunción mediante modelación estocástica.....</b>	<b>126</b>
<b>4.3. Consideraciones finales .....</b>	<b>128</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>129</b>
<b>6. ANEXOS: REPORTE DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLAS, COMO MEDIOS DE VERIFICACIÓN.....</b>	<b>131</b>
<b>6.1. Anexo A: Tesis de Grado “Evaluación de modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción” – Olga Orihuela et. al. (2018) .....</b>	<b>131</b>
<b>6.2. Anexo B: Tesis de Grado “Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”, Rosa Aseretto et al. (2018) .....</b>	<b>131</b>
<b>6.3. Anexo C: Participación del equipo de trabajo en el XXIII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguacu – Brasil. Año 2019.....</b>	<b>131</b>
<b>6.4. Anexo D: Informes de instalación de reglas hidrométricas automáticas .....</b>	<b>131</b>
<b>6.5. Anexo E: Participación en Taller “Cambio Global y Riesgos Climáticos Biodiversidad, Agricultura, Salud, Recursos Hídricos en la Cuenca del Paraguay”. Año 2017.....</b>	<b>131</b>
<b>6.6. Anexo F: Informe del Taller Nacional de Mediciones Hidrológicas. Año 2018.....</b>	<b>131</b>
<b>6.7. Anexo G: Memoria de cooperación técnica CIH – UCA. Año 2018.....</b>	<b>131</b>
<b>6.8. Anexo H: Informe de medición de caudales río Paraguay y capacitación. Año 2018 .....</b>	<b>131</b>
<b>6.9. Anexo I:Portal web del proyecto .....</b>	<b>131</b>



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> (a) Cuenca del Plata y (b) Cuenca del río Paraguay. Fuente CicPlata.org .....	10
<b>Figura 2.</b> Secciones Transversales y áreas inundables Tr 100 años. Takahashi R. 2016 .....	18
<b>Figura 3.</b> Modelo Hidrológico e Hidráulico CMMAH MOPC.1990 .....	19
<b>Figura 4.</b> Representación de modelos determinístico y estocástico. V.T.Chow 2004 .....	21
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de resultado obtenido para predicciones estocásticas.....	23
<b>Figura 6.</b> Pronóstico de caudales hidrométricos a nivel mensual, método de Rojo (2011). .....	24
<b>Figura 7.</b> Ejemplos de pronósticos operativos de la DMH-DINAC. ....	25
<b>Figura 8.</b> Ajuste de distribuciones estadísticas a datos del río Paraguay en Asunción.....	26
<b>Figura 9.</b> Principales cuencas hidrográficas de la Región Oriental. Fuente: Elaboración propia.....	27
<b>Figura 10.</b> Esquema de modelación hidrodinámica del río Paraguay.....	28
<b>Figura 11.</b> Cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.....	29
<b>Figura 12.</b> Cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia. ....	30
<b>Figura 13.</b> Cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia. ....	31
<b>Figura 14.</b> Cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.....	32
<b>Figura 15.</b> Cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia. ....	33
<b>Figura 16.</b> Modelo Digital de Elevación utilizado. Fuente: procesado a partir de datos del SRTM..	37
<b>Figura 17.</b> Zonas del Río Paraguay con información batimétrica. ....	38
<b>Figura 18.</b> Ejemplo de datos batimétricos utilizados.....	38
<b>Figura 19.</b> Planicie de Inundación del Río Amazonas. Fuente: (Yamazaki, et. al., 2017). ....	39
<b>Figura 20.</b> Configuración de la geomorfología del Río Paraguay. ....	40
<b>Figura 21.</b> Tramo del Río Paraguay en Planta con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM).....	40
<b>Figura 22.</b> Tramo del Río Paraguay en perspectiva con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM)...	41
<b>Figura 23.</b> Orden de suelos Región Oriental. Fuente: Elaborado con datos del PRUT (1995). ....	42
<b>Figura 24.</b> Estaciones pluviométricas utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	43
<b>Figura 25.</b> Estaciones hidrométricas utilizadas (ANNP). Elaboración propia.....	44
<b>Figura 26.</b> Datos de Niveles Observados. Periodo: 2006 – 2018. ....	45
<b>Figura 27.</b> Correlación entre niveles registrados en Asunción y Villeta.....	45
<b>Figura 28.</b> Correlación entre niveles registrados en Puerto Rosario y Concepción.....	46
<b>Figura 29.</b> Correlación entre niveles registrados en Alberdi y Pilar.....	46
<b>Figura 30.</b> Curva Altura-Caudal en Puerto Murtiño. ....	46
<b>Figura 31.</b> Serie de Caudal en Puerto Murtiño (Periodo: 1939 – 2018).....	47
<b>Figura 32.</b> Esquema del Soil Moisture Accounting. Fuente: Manual del Usuario HEC-HMS. ....	48
<b>Figura 33.</b> Sección transversal 8 puntos. Fuente: Manual de Ref. Técnicas del HEC-HMS.....	51
<b>Figura 34.</b> Polígonos Thiessen procesados para distribución de precipitación. Elaboración propia	52
<b>Figura 35.</b> Área trapezoidal del canal.....	54
<b>Figura 36.</b> Secciones transversales trazadas sobre el MDE (líneas verdes). ....	57
<b>Figura 37.</b> Perfil Longitudinal del Río Paraguay en el entorno HEC-RAS.....	58
<b>Figura 38.</b> Trechos de calibración del modelo. ....	61
<b>Figura 39.</b> Esquema simplificado de procesos para automatización de los modelos hidrológicos..	63
<b>Figura 40.</b> Estaciones hidrométricas del alcance geográfico. Base de datos del río Paraguay.....	65
<b>Figura 41.</b> Ejemplo de error encontrado en la serie de Asunción. ....	67

<b>Figura 42.</b>	Serie histórica de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción 1904-2018.....	68
<b>Figura 43.</b>	Distribución de frecuencias de niveles del río Paraguay en Asunción.....	69
<b>Figura 44.</b>	Descomposición de la serie histórica de niveles de Asunción. (1904-2018). .....	70
<b>Figura 45.</b>	Medias anuales de niveles del río Paraguay en Asunción. ....	72
<b>Figura 46.</b>	Análisis de varianza serie histórica de niveles (1904 a agosto-2018) en Asunción .....	72
<b>Figura 47.</b>	Anomalía detectada en enero de 1971.....	73
<b>Figura 48.</b>	Suma de diferencias diarias de niveles río Paraguay en Asunción. Periodo 1904-2018..	74
<b>Figura 49.</b>	Serie de Asunción 1 vez diferenciada. ACF (izquierda) y PACF (derecha).....	75
<b>Figura 50.</b>	Subcuencas del río Apa. Fuente: Elaboración propia.....	76
<b>Figura 51.</b>	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Apa. Elaboración propia.....	76
<b>Figura 52.</b>	Subcuencas del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia. ....	77
<b>Figura 53.</b>	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia. ....	77
<b>Figura 54.</b>	Subcuencas del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.....	78
<b>Figura 55.</b>	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Ypané. Fuente: Elaboración propia.....	78
<b>Figura 56.</b>	Subcuencas del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.....	79
<b>Figura 57.</b>	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.....	79
<b>Figura 58.</b>	Subcuencas del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia. ....	80
<b>Figura 59.</b>	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia. ....	81
<b>Figura 60.</b>	Estaciones utilizadas en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia. ....	82
<b>Figura 61.</b>	Calibración en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia. ....	83
<b>Figura 62.</b>	Validación en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.....	83
<b>Figura 63.</b>	Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Apa .....	84
<b>Figura 64.</b>	Estaciones utilizadas en la cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia. ....	85
<b>Figura 65.</b>	Caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto .....	86
<b>Figura 66.</b>	Calibración del modelo hidrológico cuenca río Aquidabán. Elaboración propia.....	87
<b>Figura 67.</b>	Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca Aquidabán.....	87
<b>Figura 68.</b>	Estaciones utilizadas en la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.....	88
<b>Figura 69.</b>	Caudales sintéticos generados en la estación Belén. Fuente: Elaboración propia. ....	89
<b>Figura 70.</b>	Calibración del modelo hidrológico cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia. ....	89
<b>Figura 71.</b>	Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca del río Ypané. ....	90
<b>Figura 72.</b>	Estaciones utilizadas en la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia. ....	90
<b>Figura 73.</b>	Caudales sintéticos generados en la estación Cruce Ruta 3. Rio Jejuí.....	91
<b>Figura 74.</b>	Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Jejuí. Elaboración propia.....	92
<b>Figura 75.</b>	Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca del río Jejuí. ....	92
<b>Figura 76.</b>	Estaciones utilizadas en la cuenca del río Manduvirá. Elaboración propia. ....	93
<b>Figura 77.</b>	Caudales sintéticos generados en la estación TobatíTuyá. Elaboración propia. ....	94
<b>Figura 78.</b>	Calibración del modelo hidrológico cuenca del río Manduvirá. Elaboración propia.....	95
<b>Figura 79.</b>	Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca río Manduvirá.....	95
<b>Figura 80.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Calibración).....	97
<b>Figura 81.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Calibración)..	98
<b>Figura 82.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Pto. Rosario (Periodo de Calibración)..	98
<b>Figura 83.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Calibración). ....	99
<b>Figura 84.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Calibración). ....	99
<b>Figura 85.</b>	Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Calibración). ....	100

<b>Figura 86.</b> Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Validación).....	101
<b>Figura 87.</b> Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Validación)..	101
<b>Figura 88.</b> Niveles Simulados y Observados Estación Puerto Rosario (Periodo de Validación).....	102
<b>Figura 89.</b> Niveles Simulados y Observados Estación Asunción (Periodo de Validación).....	102
<b>Figura 90.</b> Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Validación).....	103
<b>Figura 91.</b> Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Validación). .....	103
<b>Figura 92.</b> Panel HMS del proyecto en YRATO (CIH).....	105
<b>Figura 93.</b> Panel RAS en YRATO.....	106
<b>Figura 94.</b> El Niño y la Niña Año-Intensidades basado en el ONI.....	107
<b>Figura 95.</b> Curvas de promedio histórico de años Niña y Niño y de Asunción 2018. ....	108
<b>Figura 96.</b> Primera previsión, agosto 2018. ....	110
<b>Figura 97.</b> Pronostico Asunción con promedio histórico de Niña y Niño, julio a diciembre 2018..	111
<b>Figura 98.</b> Periodo de previsión del 2/07 al 2/08/2018. t=5.....	114
<b>Figura 99.</b> Año 2018 con 1933,1966 y 1971.....	114
<b>Figura 100.</b> Años 2018 con 1915, 1944, 2016. Mayo a julio. ....	116
<b>Figura 101.</b> Replicando la serie. 2018 con 1933 y 1944.....	118
<b>Figura 102.</b> Ecuación lineal 2018 con 1944.....	118
<b>Figura 103.</b> Comparativo Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe para periodo de Calibración y Validación.....	124
<b>Figura 104.</b> Zonas recomendadas para realizar campañas de batimetría, progresivas referenciadas al cero del Río Paraguay en confluencia. ....	125

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Resultados esperados del Proyecto 14-INV-280. ....	13
<b>Tabla 2.</b> Estaciones pluviométricas utilizadas. Fuente: Elaboración propia. ....	43
<b>Tabla 3.</b> Valores asignados a abstracciones iniciales por cobertura vegetal. Fuente: Vélez, 2009. .	48
<b>Tabla 4.</b> Espaciamiento entre Secciones Transversales para distintos criterios. ....	56
<b>Tabla 5.</b> Datos Observados y Secciones Transversales asociadas. ....	57
<b>Tabla 6.</b> Aportes Laterales y Secciones Transversales asociadas. ....	58
<b>Tabla 7.</b> Valores de manning para canales (Ven Te Chow, 1959). ....	58
<b>Tabla 8.</b> Valores de manning para planicies de inundación (Ven Te Chow, 1959). ....	59
<b>Tabla 9.</b> Trechos de Calibración y Secciones Transversales Asociadas. ....	61
<b>Tabla 10.</b> Fecha de inicio y fin de los datos recopilados. ....	65
<b>Tabla 11.</b> Fechas con faltantes de datos de niveles del río Paraguay. ....	66
<b>Tabla 12.</b> Distribución de frecuencias de niveles del río Paraguay en Asunción. ....	68
<b>Tabla 13.</b> Media y desviación típica para diferentes épocas, de niveles en Asunción. ....	69
<b>Tabla 14.</b> Clasificación en aguas altas y bajas del periodo 1974-91. ....	71
<b>Tabla 15.</b> Análisis de desviación estándar y covarianza para diferentes periodos. ....	74
<b>Tabla 16.</b> Indicadores de evaluación del modelo hidrológico en la cuenca del río Apa ....	84
<b>Tabla 17.</b> Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto ....	85
<b>Tabla 18.</b> Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Belén. Elaboración propia. ....	88
<b>Tabla 19.</b> Ajuste de caudales sintéticos generados en estación Cruce Ruta 3. Elaboración propia. ....	91
<b>Tabla 20.</b> Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación TobatíTuyá. Elaboración propia. ....	93
<b>Tabla 21.</b> Criterio de Molnar (2011) para evaluación del desempeño en base al NSE. ....	97
<b>Tabla 22.</b> Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Calibración. ....	100
<b>Tabla 23.</b> Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Validación. ....	103
<b>Tabla 24.</b> Años Niño y Niña e intensidades basados en el ÍNDICE OCEÁNICO EL NIÑO (ONI) ....	107
<b>Tabla 25.</b> Organización de datos de nivel en Asunción. ....	108
<b>Tabla 26.</b> Coeficientes de las ecuaciones de regresión lineal para cada previsión. ....	108
<b>Tabla 27.</b> Correlación Concepción-Asunción periodo 2010-2018. ....	112
<b>Tabla 28.</b> Periodo de previsión del 2/07 al 2/08/2018 para t=5. ....	113
<b>Tabla 29.</b> Previsión del 9-08 al 9-09 de 2018. ....	115
<b>Tabla 30.</b> Previsión del 15-08 al 15-09 2018 con 1944. ....	117
<b>Tabla 31.</b> Coeficientes utilizados en el modelo ARIMA. ....	119
<b>Tabla 32.</b> Previsión agosto 2018. ARIMA. ....	120
<b>Tabla 33.</b> Previsión setiembre 2018. ARIMA. ....	121
<b>Tabla 34.</b> Resumen de resultados, Caso D. ....	121
<b>Tabla 35.</b> Aporte de caudal de las cuencas de estudio. ....	122

## Lista de Anexos

<b>Anexo</b>	<b>Denominación</b>
<b>Anexo A</b>	Tesis de Grado “Evaluación de modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción” – Olga Orihuela et. al. (2018)
<b>Anexo B</b>	Tesis de Grado “Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”, Rosa Aseretto et al. (2018)
<b>Anexo C</b>	Participación del equipo de trabajo en el XXIII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguacu – Brasil. Año 2019
<b>Anexo D</b>	Informes de instalación de reglas hidrométricas automáticas
<b>Anexo E</b>	Participación en Taller “Cambio Global y Riesgos Climáticos Biodiversidad, Agricultura, Salud, Recursos Hídricos en la Cuenca del Paraguay”. Año 2017
<b>Anexo F</b>	Informe del Taller Nacional de Mediciones Hidrológicas. Año 2018
<b>Anexo G</b>	Memoria de cooperación técnica CIH – UCA. Año 2018
<b>Anexo H</b>	Informe de medición de caudales río Paraguay y capacitación. Año 2018
<b>Anexo I</b>	Portal web del proyecto

## 1. Introducción

El río Paraguay junto a los ríos Paraná y Uruguay constituye uno de los principales formadores de la cuenca del Plata, la segunda mayor de América del Sur y la cuarta mayor del planeta. La superficie de su cuenca es de aproximadamente 1.000.000 de km<sup>2</sup> hasta su confluencia con el río Paraná. La parte alta de la cuenca, denominada Alto Paraguay de unos 600.000 km<sup>2</sup> incluye partes de Bolivia, Brasil y Paraguay, en donde se localiza uno de los humedales más grandes del mundo, el Pantanal de aproximadamente 180.000 km<sup>2</sup>. La cuenca del río Paraguay y su ubicación dentro de la cuenca del Plata se ilustra en la figura 1.

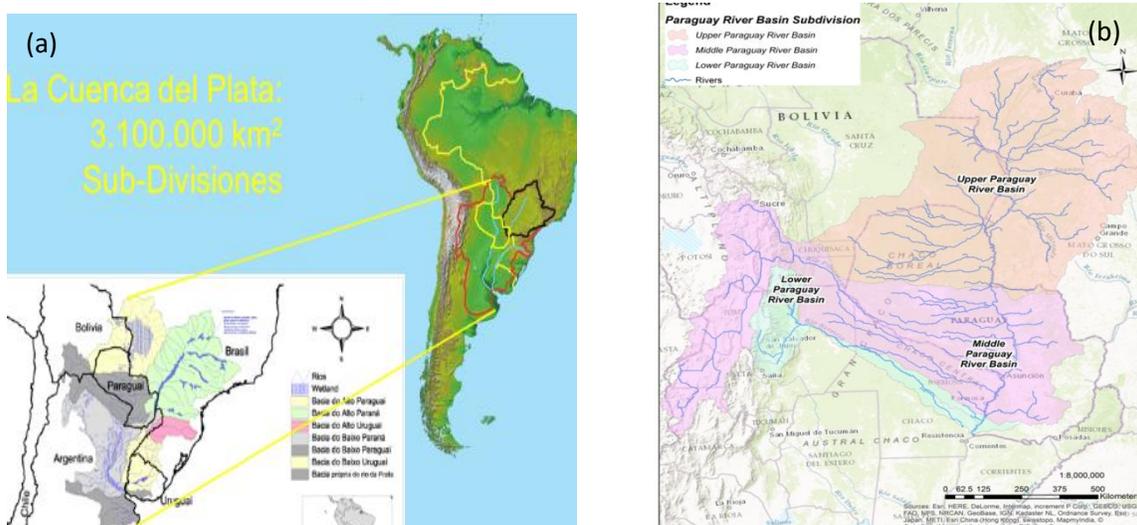


Figura 1. (a) Cuenca del Plata y (b) Cuenca del río Paraguay. Fuente CicPlata.org

Para el Paraguay, la gestión hidrológica del río Paraguay es fundamental por su situación de país mediterráneo y su dependencia del uso del río para fines múltiples, principalmente la navegación fluvial (para el país, la Hidrovía representa el medio más económico para el transporte de mercaderías a granel. Prácticamente el 100 % de las exportaciones utiliza la vía fluvial y el 80 % de las importaciones.), También es utilizado para abastecimiento de agua (incluido descarga de efluentes sanitarios) para los usos humano, industrial y agrícola. Los eventos extremos de crecidas y estiajes del río presentan efectos importantes sobre diversos sectores: las crecidas provocan inundaciones ribereñas con perjuicios socioeconómicos y ambientales en poblaciones ribereñas e infraestructuras asociadas (vías de comunicación, construcciones, etc.). Los estiajes provocan severos impactos sobre la navegación fluvial con perjuicios por sobrecostos en los fletes, impactos en la captación de agua para diversos usos y en la biodiversidad acuática. En estos casos, se deben ejecutar obras de dragado en el río a fin de garantizar un calado mínimo para el transporte de embarcaciones entre Pilar y Concepción, principalmente. Investigaciones del PNUD han determinado que en los años de inundaciones severas como la de los años 1982/83 se han tenido fuertes impactos en el PIB del país. En consecuencia, el manejo eficiente y confiable de la información del comportamiento del río a corto y mediano plazo es fundamental para la toma de decisiones con relación a las actividades ya descritas.

Las imágenes históricas a continuación señalan la importancia histórica como vía navegable



Navegación a vela, río Paraguay frente a Asunción, 1904



Boca de la bahía de Asunción, 1930



Puerto de Asunción, Bajante extraordinaria 1931



Puerto de Asunción, Crecida extraordinaria 1983



Típicos meandros del río Paraguay tramo medio.



Puente Remanso Castillo sobre el río Paraguay

## 1.1. Justificación

El país necesita un sistema de pronóstico eficiente, el cual pueda ser utilizado a nivel regional, atendiendo a que el río Paraguay es un río transfronterizo dentro de la cuenca del Plata.

En el río Paraguay (ANNP) se cuenta con un récord de datos de nivel de agua diarios de un poco más de 100 años en varias estaciones tanto al norte como al sur de Asunción. La variación normal anual es de 3 metros y en casos de crecidas puede variar hasta 10 metros. Esta gran variación, asociada a una extensa planicie inundable ocasiona inundaciones importantes en el tramo paraguayo. Un sistema de pronóstico en la actualidad, de acuerdo al estado del arte de la ciencia y tecnología debe incorporar datos del cauce, datos de precipitación regional e incluso del cambio de uso del suelo en la cuenca hidrográfica, a fin de poder desarrollar pronósticos en base a diferentes escenarios como los considerados por el cambio climático (IPCC). También hoy se dispone de información de radar meteorológico y el uso de informaciones generadas por sensores remotos (satélites). Sin embargo, en ausencia de sistemas de pronóstico confiable en la actualidad y atendiendo a la información disponible (ausencia de series históricas de caudales), se plantea la necesidad de instalar un proceso secuencial para el desarrollo e implantación de un sistema de pronóstico de caudales y niveles en el río Paraguay, a fin de poder estimar con un nivel razonable de confiabilidad el estado futuro en base a los datos que hoy se observan.

Para ello se requiere, en base al análisis de la serie de datos disponibles establecer las tendencias en el comportamiento del río. Por otro lado, atendiendo a la situación institucional del sector, la participación del sector académico es clave para aportar los subsidios de investigación para mejorar el conocimiento del comportamiento de los recursos hídricos superficiales.

Se espera iniciar un proceso sostenible, articulando acciones entre la Academia y organismos claves del Estado como la Armada Nacional, la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC, la Secretaria de Emergencia Nacional, la ANNP, el MADES, los municipios y el sector privado vinculado con la navegación fluvial, entre otros.

El estudio pretende contribuir al desarrollo de un sistema de pronóstico que pueda representar con un nivel de confianza aceptable el comportamiento del río Paraguay entre el Pantanal y la confluencia con el río Paraná en base a la información y la tecnología disponible en la región.

A nivel social y contemporáneo, la trascendencia del tema consiste en desarrollar un sistema de pronóstico que permita un uso más eficiente de los recursos hídricos del río Paraguay, principalmente la navegación y el uso para abastecimientos para diversos usos. Actualmente, no se cuenta con un sistema de pronóstico de mediano plazo. La participación académica posibilita una mejor interacción entre este estamento y otros de la sociedad para contribuir al mejor entendimiento de los recursos hídricos, y en este caso la cuenca del Río Paraguay, río transfronterizo compartido con Brasil, Bolivia y Argentina.

## 1.2. Objetivos

- **General**
  - Desarrollar e implementar un sistema de pronóstico operativo del río Paraguay.
- **Específicos**
  - Caracterización Hidrológica e Hidráulica del río Paraguay y su cuenca de aporte,

- instalación de un conjunto de sensores de nivel hidrométricos y pluviométricos en sitios estratégicos del río y su cuenca,
- evaluación de modelos hidrológicos de pronósticos existentes y aplicables al río Paraguay,
- desarrollo e implementación del sistema de pronóstico para el río Paraguay con horizontes hasta 90 días.

### 1.3. Resultados esperados

En la tabla 1, se detallan los resultados esperados del proyecto, fijados inicialmente, los cuales fueron realizados conforme se detalla en el presente informe final.

**Tabla 1.** Resultados esperados del Proyecto 14-INV-280.

<b>RE #1:</b>	Sistema de pronóstico de niveles y caudales del río Paraguay a 60 - 90 días implementado con calibración y validación
<b>RE #2:</b>	Publicación sobre la Caracterización de las inundaciones y estiajes del río Paraguay
<b>RE #3:</b>	Base de datos hidrológico del río Paraguay implementado
<b>RE #4:</b>	Portal web del proyecto con el Sistema de Pronóstico del río Paraguay
<b>RE #5:</b>	2 estudiantes de la FCyT UC capacitados para operar el sistema de pronóstico

### 1.4. Organización del estudio

En el primer capítulo, se describe el proyecto y su alcance, diferenciando entre la investigación principal, el sistema de pronóstico y las investigaciones y acciones que se realizaron en simultáneo: dos tesis de grado desarrolladas por estudiantes de grado e integrantes del equipo de investigación, también la instalación de dos estaciones de medición de niveles hidrométrico automáticos, la medición de caudales en el río Paraguay y capacitaciones en medición de caudales de ríos

En el segundo capítulo, materiales y métodos, se presenta la revisión bibliográfica de los antecedentes de estudios similares en el país y la región, luego, se establece el área territorial de

intervención para el sistema de pronóstico. Posteriormente, se detallan los programas informáticos (software) y datos utilizados. Asimismo, se describe la metodología utilizada para los trabajos de investigación; la implementación de los modelos matemáticos, el acople y la puesta en marcha del sistema de pronóstico, así como los métodos utilizados en las dos tesis de grado desarrolladas por integrantes del grupo de trabajo, de la carrera ingeniería ambiental de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Católica de Asunción.

En el tercer capítulo, se presentan los resultados de cada componente del proyecto y los logros en su periodo de implementación. Empezando por el sistema de pronóstico de crecidas ya en funcionamiento, los resultados principales de las tesis de grado desarrolladas en el área de estudio por dos integrantes del equipo de trabajo, instalación de estaciones hidrométricas automatizadas y las mediciones de caudal realizadas en el río Paraguay, las jornadas de capacitación, creación del portal web del proyecto, entre otros.

En el cuarto capítulo, se detallan las conclusiones y recomendaciones en base a la experiencia en el desarrollo de los productos, la posibilidad de líneas de investigación y optimización en los resultados.

En el quinto capítulo, se cita la bibliografía utilizada y por último, en los anexos, se detallan todos los productos desarrollados y los medios de verificación.

## 2. Materiales y Métodos

En este capítulo, se detallan, las características del área de estudio, los antecedentes referentes al objetivo principal del proyecto y la metodología ejecutada de forma a cumplir con los objetivos previamente definidos.

En cuanto a los productos, se diferencian los modelos hidrológicos e hidráulico implementados, cuyo acople, mediante apoyo del Centro Internacional de Hidroinformática de Itaipu, se constituyen propiamente en el sistema de pronóstico de caudales del río Paraguay. A la par, se desarrollaron modelaciones estocásticas basadas en niveles medidos en 3 estaciones hidrométricas en el cauce del río Paraguay, y se generaron a su vez, previsiones con esta metodología

Por otro lado, en concordancia con los objetivos específicos detallados, se desarrollaron actividades y productos orientados a mejorar el entendimiento del río Paraguay y a difundir las capacidades adquiridas en el desenvolvimiento del proyecto, entre estas, se destacan la presentación de dos tesis de grado de alumnas de la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” realizadas en base a las metodologías mencionadas, así como la instalación de estaciones hidrométricas automáticas en puntos de interés del cauce y la realización de jornadas de capacitación. Además, integrantes del equipo de investigación, presentaron resultados del proyecto en eventos locales y regionales en el área de estudio. Estas actividades se presentan en el Anexo del informe.

## 2.1. Revisión Metodológica

A fin de establecer y seleccionar la metodología adecuada para efectuar el sistema de pronóstico para determinar el comportamiento de las alturas hidrométricas y caudales en un punto determinado del río Paraguay es necesario identificar las herramientas disponibles para simular las condiciones del río y su cuenca hidrográfica con los datos disponibles aguas arriba del cauce.

A ese efecto se utilizan modelos matemáticos en versión libre, a fin de representar el sistema hídrico en un lenguaje de fácil acceso y buscar respuestas para diferentes entradas, en este caso en un sistema natural.

El modelo por sí solo no es un objetivo, pero si una herramienta para alcanzar el objetivo que es la previsión de una crecida o un estiaje a partir del comportamiento del clima y la respuesta de la cuenca ante entradas como la precipitación aguas arriba del punto estudiado. Evidentemente la limitación de un modelo se refiere a los datos de entrada al sistema en sus aspectos cuantitativos y cualitativos.

La utilización modelos matemáticos para pronósticos hidrológicos fue ampliamente desarrollada en las últimas décadas gracias al desarrollo de los paquetes informáticos con fácil acceso, muchos de ellos en versión libre.

Los modelos se clasifican usualmente en físicos, analógicos y matemáticos. El modelo físico consiste en una representación de un sistema por un prototipo de escala menor (usualmente utilizados en centrales hidroeléctricas), los analógicos utilizan la analogía que rigen fenómenos físicos como los hidráulicos con circuitos eléctricos y los modelos matemáticos, llamados también digitales representan la naturaleza de un sistema a través de ecuaciones matemáticas.

Según Tucci (1998), en la simulación, que es el proceso de utilización de un modelo, existen tres fases: (i) estimación o ajuste de parámetros, (ii) verificación, que es la simulación del modelo con los parámetros estimados y (iii) la previsión que es la simulación con los parámetros ajustados.

Los elementos claves para la estimación de los parámetros es función de la disponibilidad de datos históricos, mediciones de datos hidrológicos y meteorológicos así como características físicas del sistema, en este caso las cuencas hidrográficas para la modelación hidrológica y el cauce hídrico del río Paraguay para la modelación hidráulica..

En la fase de verificación, con el modelo calibrado inicialmente, es verificado con otros datos.

La previsión es entendida como la fase de la simulación donde el modelo, después de ajustado es verificado y utilizado para representar la salida del sistema para situaciones desconocidas.

La previsión de caudales y niveles hidrométricos en un sistema hídrico considera la estimación de escurrimientos con antecedencia en el tiempo. La predicción es la estimación hidrológica (caudales y niveles) con un determinado nivel de probabilidad con base a datos históricos.

Varios usos del agua como el abastecimiento, la irrigación, la navegación, los aprovechamientos hidroeléctricos y la conservación ambiental dependen de la cantidad de agua disponible. Según Tucci (2003) la condición climática futura es incierta. Todos los usos del agua fueron planificados basándose en estadísticas de series históricas de datos hidrológicos considerados estacionarios.

Sin embargo, en las últimas dos décadas se observa un cambio en las tendencias observadas en diferentes puntos del planeta y el posible efecto de los cambios climáticos. (IPCC,2001) Las principales consecuencias del uso de series no estacionarias en recursos hídricos constituye el aumento de la incertidumbre de las inversiones. Las previsiones hidrológicas se pueden efectuar con antelación de unas horas y en largo plazo hasta 9 meses (Georgakakos y Kryzstofowicz, 2001).

Las previsiones de corto plazo se aplican generalmente a control de inundaciones y también en previsión de niveles y calados para la navegación, entre otros. La previsión a largo plazo es una nueva área de desarrollo en recursos hídricos, ya que en el pasado solo se utilizaban las características estacionales de las cuencas (Druce, 2001).

Por su parte, con el mejoramiento de la estimación de los modelos climáticos y la identificación de relaciones entre las condiciones de los océanos y las variables hidrológicas (Anderson et al, 2001), la previsión a plazos más largos, objeto del presente estudio para el río Paraguay, paso a presentar resultados prometedores. La previsión también se utiliza para estudiar escenarios con anticipación de varios años (Francisco de Souza, 2002). La historia muestra con ejemplos como la sociedad en el pasado fue afectada por largos periodos de sequía o inundaciones (Diamond, 1997).

A medida de que es posible prever el comportamiento climático con mayor antelación, la predicción se transforma en previsión (Tucci). En cuanto a los modelos hidrológicos utilizados, en función al sistema a simular pueden ser a) modelos de propagación que simulan el río y se utilizan los niveles y los caudales, b) modelos de transformación lluvia a caudal, que se simula a partir de la precipitación y c) los modelos precipitación caudal con propagación en ríos, que simulan el río y las sub cuencas de aporte. En cuanto a los modelos, estos pueden ser i) empíricos, ii) conceptuales y iii) combinados.

La previsión de largo plazo (antelación de algunos meses) puede ser realizada a través de varias técnicas estadísticas, buscando similitudes con relación a la estacionalidad regional.

En el río Paraguay, en su alta cuenca, con un régimen hidrológico con gran capacidad de almacenamiento (pantanal) y estacionalidad definida (periodo lluvioso), los hidrogramas pueden ser estimados con base al tiempo de traslado que puede llevar varios meses (Genz y Tucci, 1994).

En los últimos años se tienen varias iniciativas de establecer correlaciones entre las anomalías de presión y temperatura de los océanos y los caudales de algunos ríos como el océano Pacífico y la cuenca del Plata.

Más recientemente se evidenciaron correlaciones también con el océano Atlántico. En la actualidad con el uso de modelos climáticos y su acople a los modelos hidrológicos es posible transformar las variables climáticas (precipitación y evapotranspiración) en caudales. Tucci ha testado 4 de estos modelos en la cuenca del río Uruguay. Uno de ellos fue el modelo del CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y el Clima) con 6 meses de antelación con el modelo hidrológico para grandes cuencas MGB del IPH (Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul), ambos del Brasil. Juan Rojo de la Universidad Nacional de Colombia (2013) en cooperación con la DMH (DINAC) de Paraguay ha encontrado correlaciones

positivas que evidencian una dependencia fuerte y directa entre las temperaturas superficiales del océano pacífico tropical en la región Niño 3-4 y los caudales del río Paraguay.

En la actualidad existen metodologías de predicción utilizadas en la cuenca alta del río Paraguay, donde se cuenta con información hidrometeorológica suficiente para el pronóstico a través de diversos métodos. Sin embargo, a nivel local, hasta la fecha no se cuenta con un sistema de pronóstico confiable, salvo las curvas de correlación entre estaciones hidrométricas del tramo paraguayo, que proporciona un pronóstico de niveles aguas abajo para uno a cinco días. Este sistema fue desarrollado en la década de los ochenta por una misión técnica de las Naciones Unidas y utilizado por la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP) y la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). Posteriormente, La Facultad de Ingeniería (FIUNA) de la UNA, en 1994, dentro de un estudio para la determinación de las Zonas Inundables del Río Paraguay, determinó una correlación de niveles hidrométricos entre estaciones hidrométricas, para generar mapas de inundación para diferentes periodos de retorno. Más recientemente, en 1999, una tesis de grado en la FIUNA, actualizó la metodología del PNUD de 1980. En la actualidad, la DMH de la DINAC realiza predicciones estacionales (tres meses) con apoyo de la Universidad de Medellín, Colombia a través de un modelo estocástico vinculado a las oscilaciones de la temperatura media del mar (TSM) en el océano Pacífico.

En cuanto a la modelación hidrodinámica, se cuenta con el antecedente del Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico (descontinuado) del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones que con apoyo de la Cooperación Francesa, en el año 1990, desarrolló un modelo hidrológico. No obstante no hay registros del mismo ni a nivel oficial ni académico.

La tesis de Maestría realizada por Takahashi R. (2016) titulada ***Implementation of a one-dimensional hydrodynamic model for the middle Paraguay river basin***, en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Laboratorio de Hidrosistemas Ven Te Chow, USA, la cual tuvo el financiamiento a través de la beca Fulbright-Itaipu, tuvo como principal objetivo la implementación de un modelo hidrodinámico de flujo permanente utilizando métodos y datos disponibles en el momento de su realización. El área de estudio abarcó la cuenca media del Río Paraguay, que comprende el tramo entre Puerto Murtiño, Brasil y Asunción, Paraguay. Para implementar el modelo de simulación hidrodinámica, primeramente se preparó la información topo batimétrica mediante la digitalización vectorial de más de 10.000 puntos con atributos de profundidad y georeferenciado, disponibles en cartas náuticas divulgadas por la Marina Brasileña y posteriormente escalados a un sistema de referencia geográfico. Se utilizó la herramienta HEC-GeoRAS para la extracción de los principales datos requeridos por el programa HEC-RAS que son las secciones transversales, longitud de río, dirección de flujo en las llanuras inundables y sus respectivas áreas inefectivas. También se realizó un análisis estadístico para preparar los datos de caudales de diseño que corresponden a las estaciones de Puerto Murtiño y Asunción. El principal resultado de este estudio es la disponibilización de un modelo hidrodinámico capaz de ser utilizado para el mapeo de áreas inundables en puntos de interés comprendidos a lo largo del tramo simulado. Cabe mencionar que este modelo del Río Paraguay no tuvo el alcance de simular los aportes de caudales laterales de los ríos de la margen izquierda (Región Oriental) y la margen derecha (Chaco Paraguayo), sino más bien demostrar las capacidades de implementación del

modelo mediante las informaciones escasas, ya que al momento de su implementación fueron indagadas la existencia de batimetrías para la preparación de la geometría del cauce, información que no fue posible conseguir para este trabajo de tesis, atribuible a factores de confidencialidad mencionada por las partes consultadas. De cualquier forma el resultado del trabajo demostró que aún sin datos, es posible la implementación del modelo hidrodinámico con limitaciones, pero utilizable como la mejor herramienta disponible en el momento de la finalización de este trabajo. Es por eso que se recomendó seguir investigando y realizar estudio topobatimétricos que estén a disposición y mejorar la herramienta presentada.

En la siguiente figura se observa las secciones transversales implementadas en el modelo hidrodinámico y áreas inundables para un periodo de retorno de 100 años en el río Paraguay.

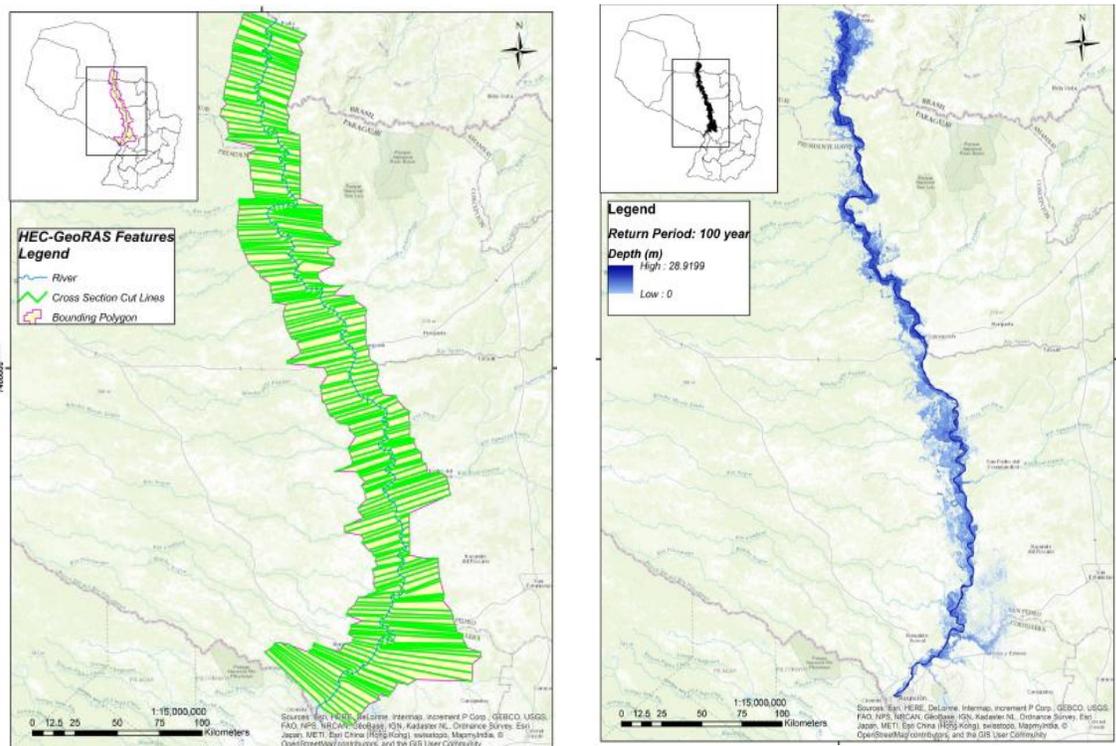


Figura 2. Secciones Transversales y áreas inundables Tr 100 años. Takahashi R. 2016

Este antecedente constituye una primera aproximación a un modelo hidrodinámico operacional y representa un trabajo que intenta replicar y dejar como legado herramientas que fueron desarrolladas en su momento por el MOPC a través del proyecto CMAAH (Centro de Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico), que tiene como antecedente la implementación del modelo hidrodinámico e hidrológico. Las siguientes figuras muestran la arquitectura adoptada por el proyecto CMAAH para la implementación del modelo hidrológico e hidrodinámico acoplado.

Este modelo implementado no ha sido entregado a un organismo de hidrología operativo como lo es la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP) y/o la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) dirección dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) que tiene como misión el monitoreo meteorológico e hidrológico a nivel nacional. Por lo tanto, no se

cuenta con este trabajo que fue implementado y no es posible aprovechar su potencial como herramienta para la toma de decisiones.

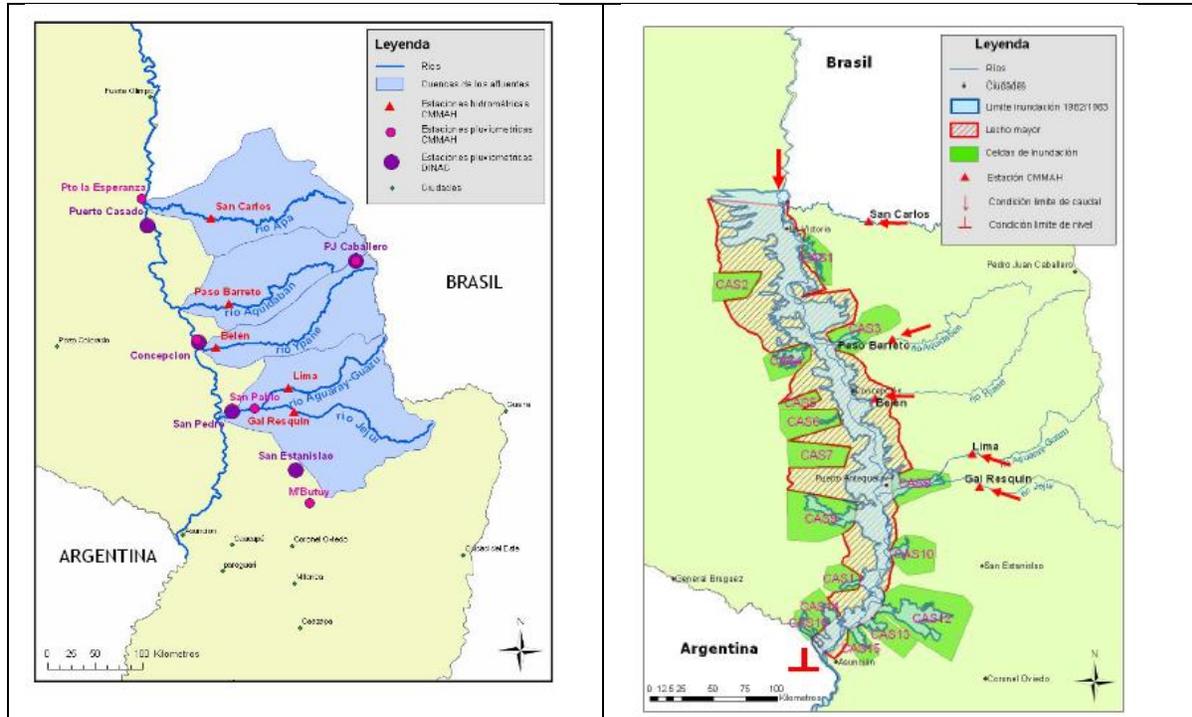


Figura 3. Modelo Hidrológico e Hidráulico CMMAH MOPC.1990

Teniendo en cuenta estos antecedentes el presente proyecto de CONACYT, mediante la realización de tareas similares ha implementado los modelos hidrológicos e hidrodinámicos en el area de intervención y que estarán a disposición para su utilización para diversos fines.

Este proyecto propone alcanzar los objetivos siguiendo las siguientes fases:

**Fase 1:** Revisión de métodos de pronóstico hidrológico disponibles a nivel regional y local, los modelos existentes, ya utilizados en el río Paraguay y en la cuenca del plata.

**Fase 2:** Selección de un Modelo Estocástico y un Modelo Hidrodinámico para desarrollar el sistema de pronóstico.

**Fase 3** (simultánea con la Fase 2): Sistematización de toda la información hidrológica disponible (hidrometría y caudales), así como datos geomorfológicos del cauce y la cuenca del río Paraguay. El resultado será la consolidación de una base de datos hidrológicos.

**Fase 4:** Monitoreo de nivel de agua de las estaciones hidrométricas del río Paraguay vigentes y la instalación de por lo menos dos estaciones automáticas para medición de niveles hidrométricos en tiempo real con transmisión remota vía GPRS/GMS a un receptor en la UCA, Asunción.

**Fase 5:** Campañas de medición de caudales en el río Paraguay en sitios a definir.

**Fase 6:** Con las campañas de medición de caudales, se actualizarán las de curvas altura-caudal en las estaciones mencionadas en la fase 5.

**Fase 7:** Calibración e Implementación del sistema de Pronóstico.

**Fase 8:** Difusión del estudio a través de un portal web y taller de difusión.

A continuación, se describen las generalidades de las herramientas, los antecedentes y los métodos utilizados en el estudio.

### 2.1.1. Modelos Estocásticos

Un modelo de cuenca hídrica es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. En principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados). En la práctica, sin embargo, las aplicaciones de la modelación son generalmente confinadas al análisis de cuencas para el cuales la descripción de variaciones espaciales temporales y/o variaciones espaciales de precipitación está garantizada.

Se reconocen distintos tipos generales de modelos matemáticos:

**Determinísticos:** son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descriptos por ecuaciones diferenciales. Es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos.

**Probabilísticos:** Un sistema se puede llamar probabilístico cuando, a igualdad de estado inicial, la respuesta ante una misma entrada es aleatoria; por lo tanto, para una misma entrada pueden obtenerse salidas diferentes, siguiendo una determinada distribución de probabilidades. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (a) estadísticos, y (b) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales, por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requiere invariablemente el uso de datos ; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos . Se clasifican en independientes del espacio y correlacionados en él, de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio . Un modelo independiente del tiempo representa una secuencia de eventos hidrológicos que no influyen entre sí , mientras que un modelo correlacionado en el tiempo representa una secuencia en la cual el evento siguiente está parcialmente influenciado por el evento anterior y posiblemente con otros.

Durante las últimas tres décadas, la teoría de la estadística, probabilidades y procesos estocásticos se ha utilizado con el objeto de tener una representación más adecuada de la variabilidad de los datos hidrológicos. Esta representación generalmente se hace mediante un modelo estocástico que describa todas las características de la serie histórica. La relevancia del uso de modelos estocásticos de series hidrológicas en el análisis de las obras hidráulicas que se proyectan, diseñan u operan, está en el hecho de poder estudiar las diferencias estructurales bajo diversas posibles condiciones hidrológicas que puedan presentarse durante el período de vida de las obras.

La figura 1 presenta la sección de un canal que se usa para representar un modelo determinístico y otro estocástico y las diferencias entre ellos. A la derecha de la figura se encuentra el dominio espacio-tiempo en el cual el espacio o distancia a lo largo del canal se representa en el eje horizontal y el tiempo en el eje vertical, para cada uno de los casos mostrados.

El caso a) es un modelo determinístico agregado de flujo permanente. Los flujos de entrada y salida son iguales y constantes en el tiempo, tal como lo muestran los puntos de igual tamaño en las líneas  $x=0$  y  $x=L$ . El siguiente caso b) incluye la aleatoriedad. La salida del sistema no se muestra como un punto de valor único, sino como una distribución que asigna una probabilidad de ocurrencia a cada uno de los valores posibles de la variable. Este es un modelo estocástico independiente del espacio y del tiempo donde la distribución de probabilidad es la misma en cualquier punto del plano espacio-tiempo y los valores en un punto no influyen en los valores obtenidos en cualquier otro lugar.

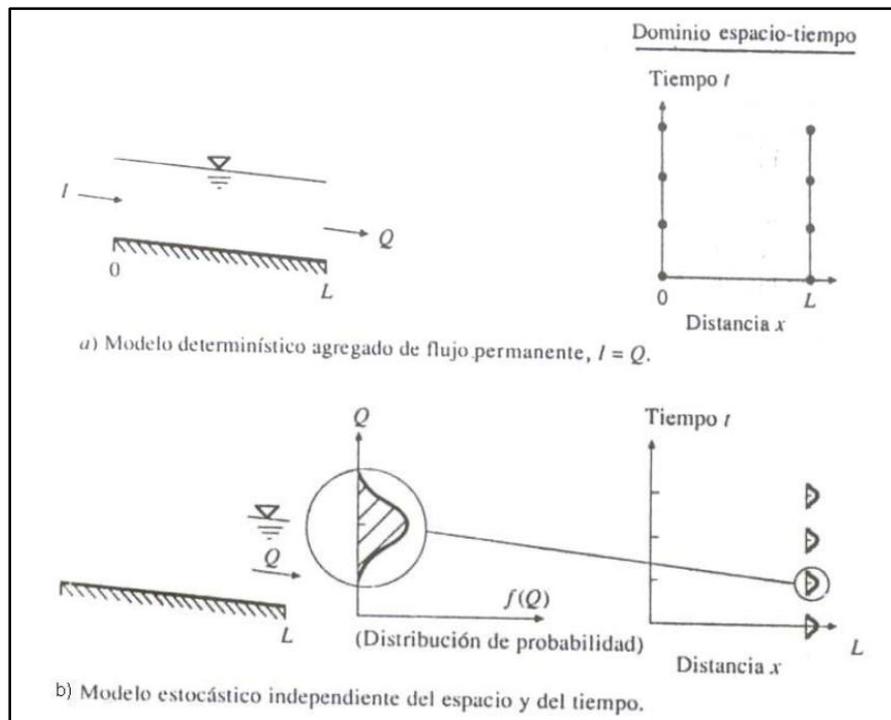


Figura 4. Representación de modelos determinístico y estocástico. V.T.Chow 2004

Modelos Conceptuales de propagación de flujo: al desarrollar modelos de sistemas hidrológicos no pueden reproducirse exactamente todos los procesos que ocurren en la naturaleza. Si tal representación fuera posible, los modelos resultantes serían imposibles de resolver. En consecuencia, es necesario hacer simplificaciones para reducir el sistema complejo al conjunto de aquellos procesos críticos para el funcionamiento del sistema. Con esto el sistema hidrológico se reduce a un modelo conceptual, entendido como un volumen delimitado en el espacio, que acepta entradas de agua, las opera internamente y produce salidas de caudal (Chow et al., 1994).

### 2.1.1.1. Tipos de Modelos Estocásticos

La simulación estocástica se usa fundamentalmente para predicciones con intervalos largos de tiempo, donde lo que interesa no es la respuesta instantánea del sistema sino los valores característicos. Como los modelos estocásticos trabajan con información estadística, es muy difícil modelar con ellos fenómenos instantáneos o de intervalos cortos de tiempo, por eso, la simulación estocástica es usada principalmente para propósitos de planeamiento, para generar series "igualmente probables" de caudales medios mensuales, por ejemplo.

Existen distintos tipos de modelos estocásticos aplicados a la hidrología. Se pueden citar algunos:

- Los modelos de correlación y regresión,
- los modelos de distribución de probabilidad,
- el modelo de Monte Carlo para la generación de series sintéticas,
- el modelo de Markov.

### 2.1.2. Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos

Los modelos permiten simular el comportamiento de un sistema real (prototipo) y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un determinado impulso o entrada al sistema (Fattorelli & Fernández, 2011).

La modelación hidrológica se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación (Viessman, Lewis, & Knapp, 1989).

Con respecto a esta definición, es oportuno aclarar que los "eventos" pueden tratarse de uno aislado o de un conjunto de estos a lo largo del tiempo. Para el primero de los casos, se trata de un modelo de evento, mientras que, para el segundo, se trata de un modelo continuo.

Un modelo de evento simula una sola tormenta, por lo tanto, la duración varía de unas cuantas horas a unos días. Por otra parte, un modelo continuo simula un periodo largo, prediciendo la respuesta de una cuenca durante y entre eventos de precipitación (Ford & Hamilton, 1996).

Otra gran clasificación de los modelos hidrológicos se da en cómo considera las variaciones espaciales de la cuenca. Un modelo distribuido considera explícitamente las variaciones espaciales (geográficas) de las características y procesos, mientras que, en un modelo agregado, estas variaciones espaciales son promediadas o simplemente ignoradas (Ford & Hamilton, 1996). Es importante mencionar que existen modelos semi-distribuidos, que reciben este nombre porque consideran en parte las variaciones espaciales, dividiendo la cuenca en unidades más pequeñas (subcuenas) y asignando características particulares a cada una de ellas.

La selección de un modelo determinado dependerá del objetivo del trabajo, y de la practicidad que brinde su uso con respecto a los datos disponibles.

## 2.2. Antecedentes de previsión del río en el Paraguay

### 2.2.1. Modelos Estocásticos utilizados para predecir niveles hidrométricos del río Paraguay

Desde la década de los años ochenta, se utilizaban métodos de correlación lineal para estimar el comportamiento futuro del nivel del río Paraguay basado en un punto de control aguas arriba. Estos métodos solo permiten tener una idea de translación lineal de la onda de crecida, por lo que, si se generan lluvias importantes en las cuencas intermedias, las mismas no son contempladas en la ecuación de regresión lineal y, por tanto, los resultados son alterados sustancialmente.

### 2.2.2. Estudio de Crecidas del Rio Paraguay

De Egea y Cazó (1998), realizaron una revisión de las series de datos hidrométricos del río Paraguay en los puertos de Bahía Negra, Fuerte Olimpo, La Victoria, Concepción, Pto. Antequera, Pto. Rosario, Asunción, Formosa (Argentina) y Pilar. Con ello plantearon un sistema de predicción basados en correlaciones lineales.

La correlación se realiza entre las alturas máximas anuales  $H$ , los correspondientes tiempos de traslados  $t$ , y los términos independientes  $m$  y  $b$  de las ecuaciones de base siendo  $H$  el factor común en este proceso. Estas alturas máximas son determinadas mediante métodos estadísticos de eventos extremos

En la figura 5 se pueden observar algunos resultados de este proceso.

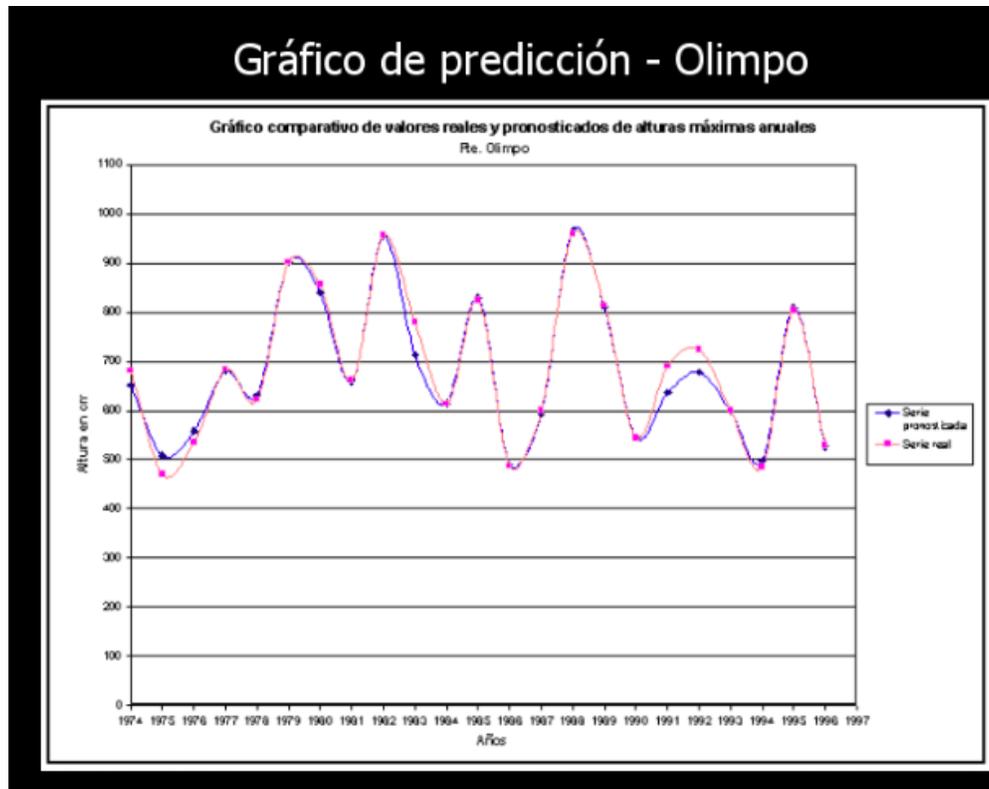
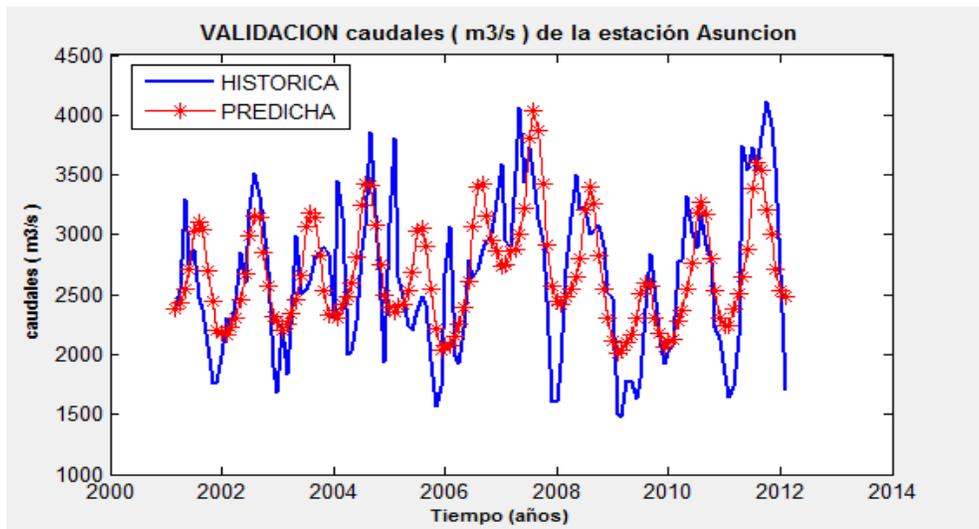


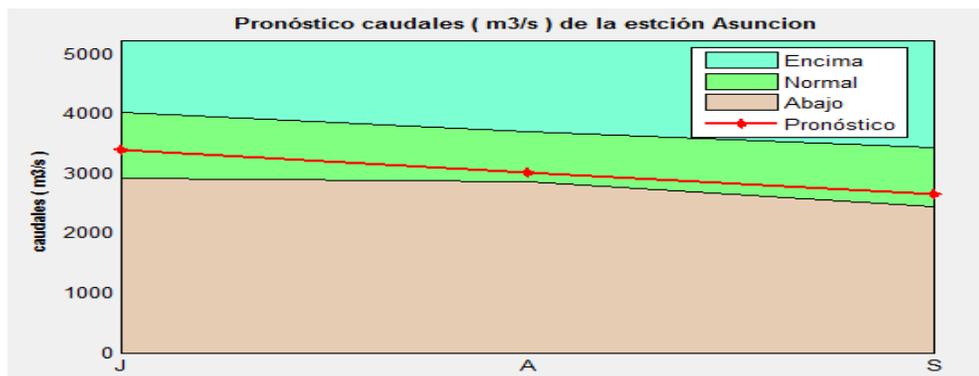
Figura 5. Ejemplo de resultado obtenido para predicciones estocásticas.

**2.2.3. Pronóstico preliminar del Río Paraguay-D. Rojo-Univ. Nacional de Colombia**  
Recientemente, se ha implementado en la Dirección de Meteorología e Hidrología el método planteado por Rojo (2011) que utiliza métodos no lineales para predicción de caudales en dos puntos de control, Concepción y Asunción. Este modelo utiliza métodos espectrales y de regresión, produciendo un pronóstico de 1, 3, 6 y 12 meses. Se generan caudales mensuales medios para los horizontes de tiempo antes mencionados. Efectúa un análisis de correlación entre las anomalías de temperaturas superficiales del mar (TSM) y los caudales medios mensuales estandarizados del río Paraguay.

En la Fig. 6 (a y b) se muestran dos ejemplos de salida del método de Rojo (2011) de caudales medidos y estimados a nivel medio mensual.



(a) Validación de caudales



(b) Pronósticos en Asunción

Figura 6. Pronóstico de caudales hidrométricos a nivel mensual, método de Rojo (2011).

#### 2.2.4. Pronósticos Rio Paraguay del Centro Meteorológico Nacional (DMH-DINAC)

La Dirección de Meteorología cuenta con un área de hidrología operativa donde se recibe y sistematiza datos hidrométricos del río Paraguay. Con esta información produce pronósticos en base a la información disponible del río Paraguay, datos generados por modelos hidroclimáticos y se disponibiliza en la web: <http://meteorologia.gov.py/>. En la figura 5 se visualiza los resultados de pronósticos a una semana.

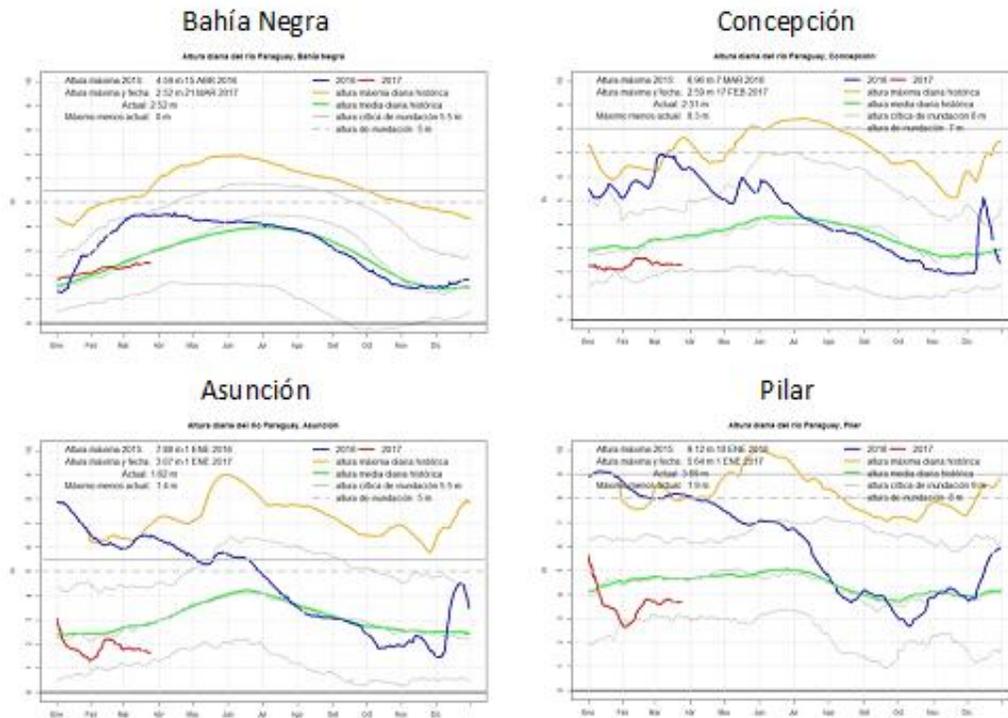


Figura 7. Ejemplos de pronósticos operativos de la DMH-DINAC.

Los niveles del río Paraguay en los puntos analizados no han variado mucho en la última semana, esta situación no se modificaría mucho debido a las previsiones de las precipitaciones esperadas en las próximas dos semanas. En la cuenca del río Paraná se espera precipitaciones de normal a inferior a la normal en las próximas semanas, esta situación no traería cambios importantes en sus niveles en el periodo considerado. Para mayor información consulte [www.meteorologia.gov.py](http://www.meteorologia.gov.py).

#### 2.2.5. Ajuste estadístico de alturas hidrométricas río Paraguay. Ing. J. L. Benza, Fiuna 1998

Este estudio efectuó un ajuste automático de distribuciones estadísticas para determinación de alturas hidrométricas para diferentes periodos de recurrencia en el río Paraguay, para el estudio Zonificación de áreas inundables del río Paraguay, CEN Fiuna (2000):

- Ajuste de las posibles curvas de distribución a los datos observados de máximos anuales en varias estaciones,
- determinación del modelo que mejor se ajusta a los datos observados en cada estación,

- c) determinación de las alturas que corresponden a cada TR en cada estación, utilizando el modelo mejor ajustado,
- d) estudio de la posibilidad de estimar alturas faltantes de algunas estaciones utilizando la relación existente entre las alturas de estaciones vecinas.

En la figura 8 se presenta uno de los resultados del estudio.

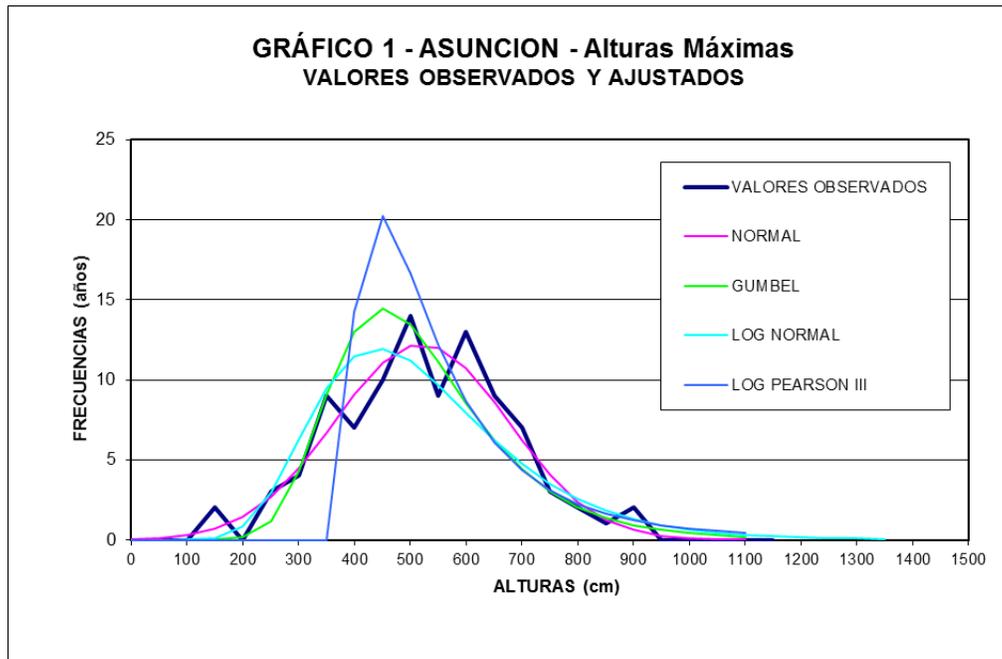


Figura 8. Ajuste de distribuciones estadísticas a datos del río Paraguay en Asunción.

## 2.3. Montaje modelo hidrodinámico río Paraguay y modelación hidrológica de cuencas de aporte

### 2.3.1. Generalidades

El Paraguay se encuentra dentro de la quinta cuenca más grande del mundo, donde los principales ríos: Río Paraguay y Río Paraná, se desarrollan a lo largo de la Región Oriental. La cuenca del Río Paraguay ocupa 106.907 km<sup>2</sup> (67%) en esta región, donde se tienen importantes afluentes que bañan a esta región.

Las cuencas hidrográficas más importantes de la región Oriental, se consideran como aporte lateral para el modelo hidráulico del río, siendo sus cauces los principales afluentes de río Paraguay: la Sub cuenca del Río Apa con 15.263 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Aquidabán con 11.769 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Ypané con 10.266 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Jejuí Guazú con 22.719 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Manduvirá con 10.583 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Piribebuy con 1.624 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Salado con 1.128 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Tobicuary con 26.295 km<sup>2</sup>. En la Figura 9 se ilustran las principales cuencas y ríos del país.



Figura 9. Principales cuencas hidrográficas de la Región Oriental. Fuente: Elaboración propia.

Se decidió simular por separado las principales cuencas de aporte al cauce en la región Oriental, considerando la significancia que éstas tienen en las ocurrencias de crecidas a lo largo del trayecto y de una forma tal que funcione en conjunto con el modelo hidráulico, proporcionando caudales de aporte lateral en el mismo.

De la margen derecha, Región Occidental o Chaco no se consideran las cuencas como aporte lateral al río Paraguay, esto atendiendo a que no se identifican cauces activos que aporten significativamente al cauce del río Paraguay frente a los cauces de la Región Oriental ya indicados. Los cauces que llegan al río Paraguay en la Región Occidental como los riachos Negro, Confuso, Verde, Montelindo y otros sólo se activan en periodos húmedos y por tanto no se los considera en esta fase de modelación hidrológica para el modelo hidráulico del río Paraguay. El único cauce relativamente importante de la región, el río Pilcomayo, solo tiene cauce activo binacional con la Argentina en unos 60 kilómetros de la frontera boliviana y luego desaparece como cauce activo a través de 2 brazos, uno en cada país y que alternativamente distribuyen aguas en periodos lluviosos a cada uno ellos. A nivel público y educativo, aún se tiene la creencia que el río Pilcomayo es frontera entre Argentina y Paraguay, el cual ya ha desaparecido en más de 300 kilómetros de cauce limítrofe por erosión retrógrada en los últimos 70 años y el cauce que llega al río Paraguay

entre Puerto Falcón y Clorinda solo es realimentación de la cuenca baja por lluvias. Más abajo, en territorio Argentino se tiene el río Bermejo el cual descarga al sur de Formosa y no se considera en este estudio, ya que se analiza el río Paraguay hasta Asunción.

Con estas consideraciones, se determinó el área de estudio de la modelación hidrológica y las cuencas a ser modeladas.

### 2.3.2. Área de Estudio

Para el desarrollo de los modelos destinados a ser utilizados en el sistema de pronóstico, se seleccionó el tramo del río Paraguay entre Puerto Murtiño (BR) y Pilar (PY). El esquema conceptual del modelo planteado se resume en lo siguiente: el dato de entrada principal es el caudal que ingresa al Río Paraguay a la altura de Puerto Murtiño, recibiendo también el caudal de los principales aportes laterales a lo largo del trecho (Modelo Hidrológico), y finalmente, se indica un forzante del nivel de agua en su extremo aguas abajo con los niveles registrados en la estación hidrométrica de Pilar. En la Figura 10 se observa con más claridad el esquema planteado.

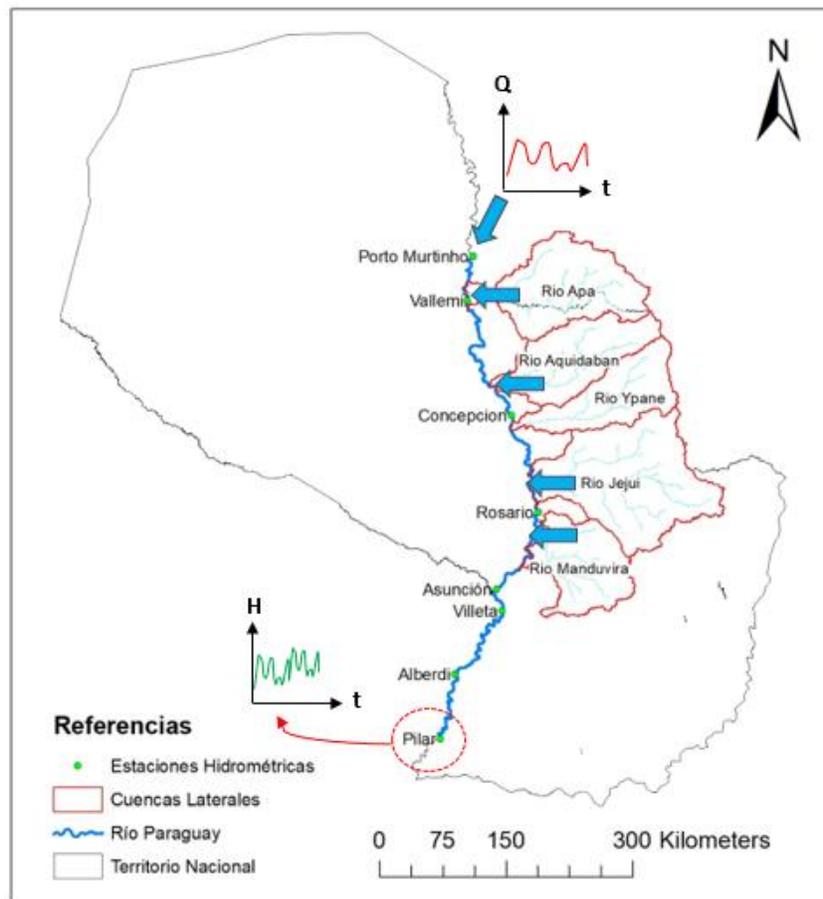


Figura 10. Esquema de modelación hidrodinámica del río Paraguay.

Como se observa, para el presente proyecto se consideraron las cuencas de mayor aporte al río Paraguay en la Región Oriental, enfocándose en las que afectan principalmente al caudal que llega a la ciudad de Asunción. A continuación, se desglosan cada una de estas cuencas de aporte.

### 2.3.2.1. Cuenca del río Apa

Posee un área de 15.263 km<sup>2</sup> (figura x), de los cuales el 75% de la cuenca se encuentra en territorio brasileño y el 25% restante en el paraguay. La naciente del río se encuentra localizada en el estado brasileño de Mato Grosso do Sul y en el departamento de Amambay en Paraguay, mientras que desemboca en el río Paraguay en el estado de Mato Grosso do Sul y el departamento de Concepción (Echeverría et al., 2011).

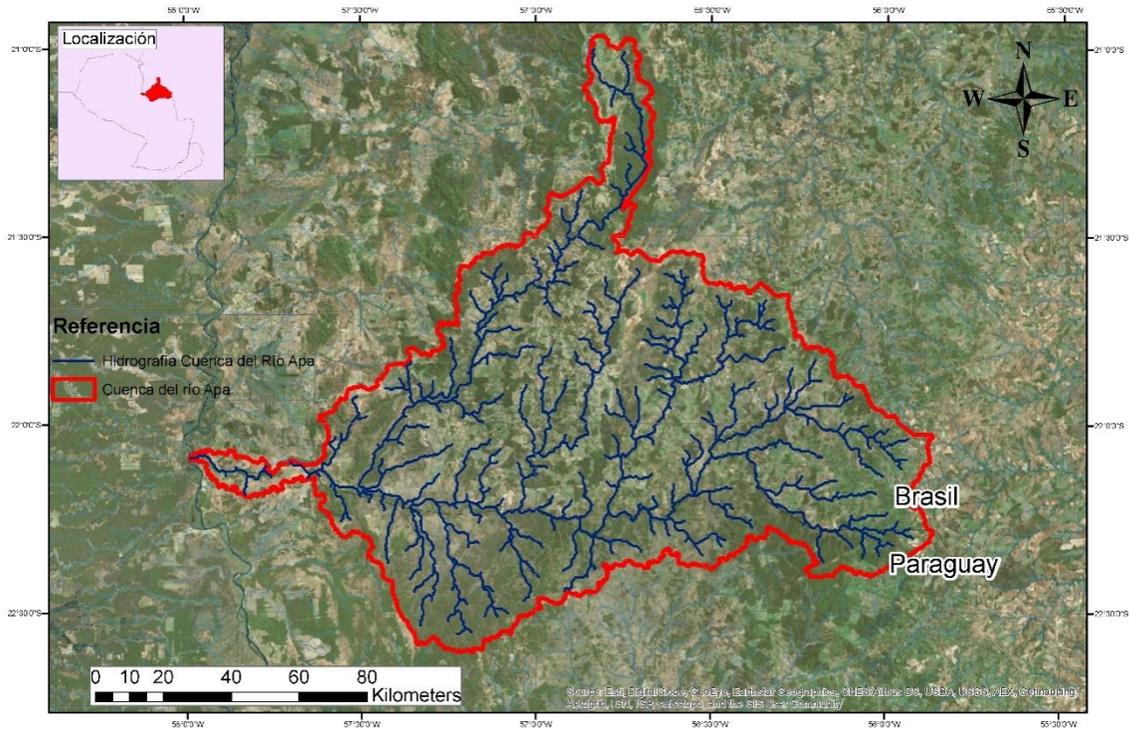


Figura 11. Cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

El río Apa recorre un territorio muy plano, presentando numerosos meandros en todo su trayecto. Entre sus afluentes más importantes, se encuentran los ríos Pirapucú, Caracol y Perdido (Echeverría et al., 2011).

Entre las principales actividades desarrolladas por la población de la cuenca, las más importantes son la pesca, el comercio y el turismo. El comercio está potenciado por tener tanto frontera fluvial como seca (Echeverría et al., 2011).

### 2.3.2.2. Cuenca del río Aquidabán

La cuenca del Río Aquidabán se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo y se extiende de este al oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al norte con la cuenca del Río Apa, al noroeste con la cuenca del Río Tagatiyá y al sur con la cuenca del Río Ypané (Tesis Cuencas Paraguay, FIUNA, Chávez et al., 2006).

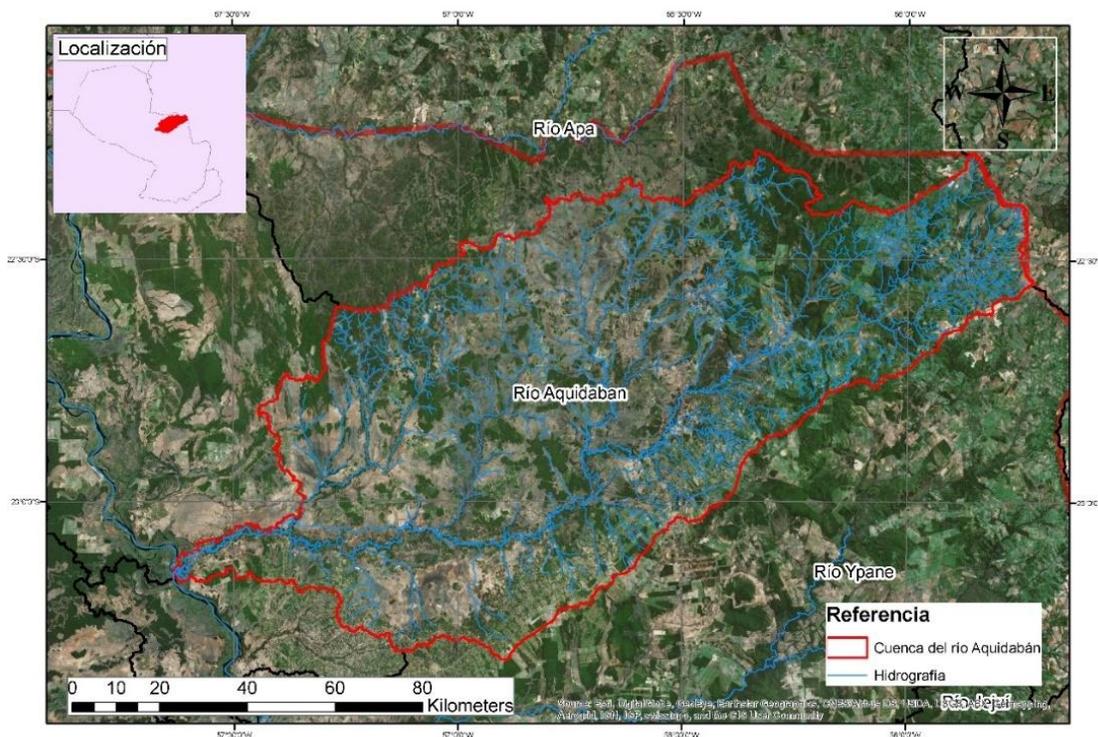


Figura 12. Cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

La superficie de la cuenca es de aproximadamente 11.769 Km<sup>2</sup> (2,9 % del país y 7,4 % de la Región Oriental) (Chávez et al., 2006).

La longitud de su curso es de aproximadamente 250 km, desembocando en el km 744 del río Paraguay, a contar desde la confluencia con el río Paraná. Este río es navegable para embarcaciones menores, pero en época de estiaje la navegación se ve obstaculizada por la presencia de arrecifes (Chávez et al., 2006).

El río Aquidabán posee numerosos afluentes, entre los cuales se pueden citar como principales al Trementina, cuyo curso tiene una extensión de 76 km, y al Negla, con un curso de 64 km de longitud. Otros afluentes en su margen derecha son el Arroyo Chacalina y el Arroyo Tacuara; mientras que en su margen izquierda se encuentran el Arroyo Primavera, Yaguaray Guazú, Yuquyry y Gasory. El clima regional corresponde al tropical cálido, característico de la zona situada al norte del trópico de Capricornio. Las temperaturas son altas en la mayor parte del año, con lluvias más probables en los meses de verano. La temperatura media anual típica es de unos 23 °C, con una máxima promedio de 30 °C en verano y una mínima de promedio de 18 °C en los meses más fríos. Estas temperaturas varían a su vez, de mayor menor a medida que uno se aleja del río Paraguay hacia la ciudad de Pedro Juan Caballero. La precipitación anual varía en el mismo sentido pero aumentando, registrándose entre 1.300 a 1.700 mm en las cercanías del río Paraguay y entre 1.700 a 1.900 mm hacia Pedro Juan Caballero (Chávez et al., 2006).

Los vientos predominantes de esta región corresponden al viento norte proveniente del Brasil, caracterizado por ser cálido y húmedo, y generalmente anticipa lluvias (Chávez et al., 2006).

### 2.3.2.3. Cuenca del río Ypané

Se extiende de este a oeste en la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil (límite natural de la cordillera de Amambay), al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Aquidabán y al sur con la cuenca del Río Jejuí Guazú. Abarca en parte a los departamentos de Concepción, San Pedro y Amambay (Chávez et al., 2006), como se ve en la figura 13.

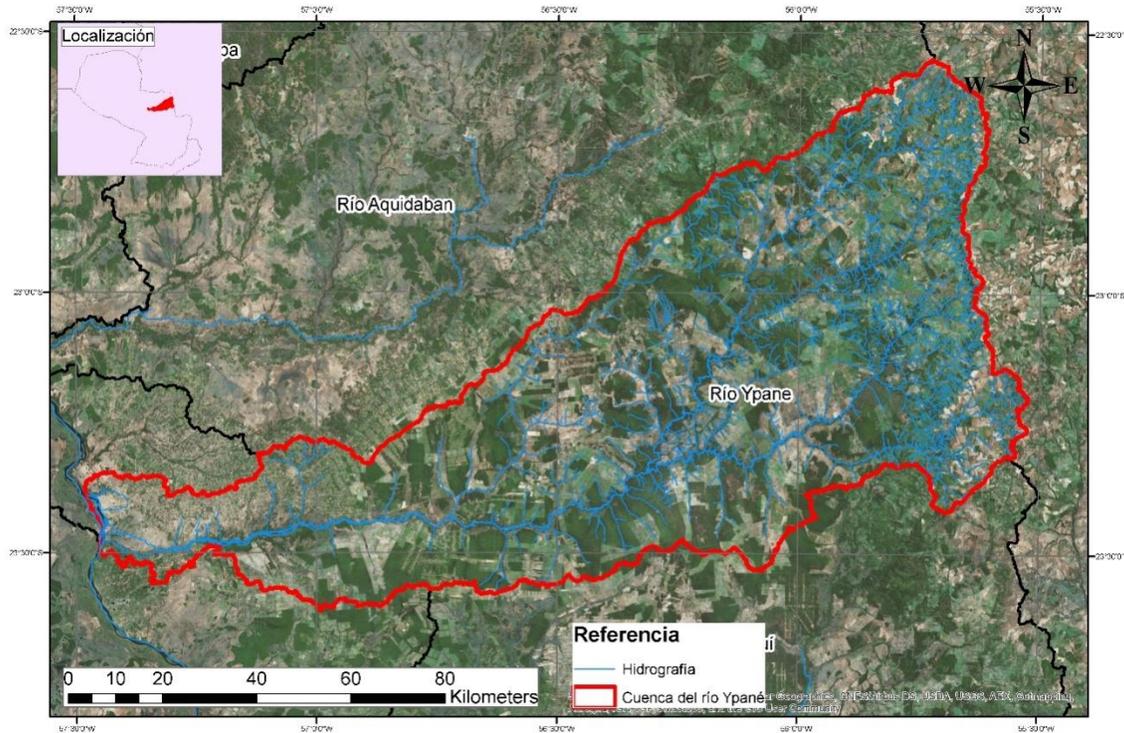


Figura 13. Cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

La superficie de su cuenca es de 10.266 Km<sup>2</sup> y la longitud del curso principal es de 282 km. aproximadamente, desembocando en la margen izquierda del río Paraguay a la altura del km 692 contando desde la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná y a unos 8 km aguas abajo del Puerto de Concepción (Chávez et al., 2006).

Entre los numerosos afluentes del río Ypané se citan como principales el río Ypané-mi de 60 km de longitud, el Guazú cuyo curso tiene una extensión de 72 km y el Cagatá de 84 km (Chávez et al., 2006).

El clima regional de la cuenca puede clasificarse como tropical. En general, las temperaturas son elevadas en la mayor parte del año y las precipitaciones son más frecuentes en épocas de verano. El viento predominante de la cuenca es el norte que proviene del Brasil, es cálido y húmedo y generalmente anticipa lluvias, según la DMH (Chávez et al., 2006).



### 2.3.2.5. Cuenca del río Manduvirá

Se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo, extendiéndose de este a oeste de la Región Oriental por una superficie de aproximadamente 10.583 km<sup>2</sup>, lindando al este con las cuencas de los Ríos Acaray y Monday, al suroeste con la cuenca del Río Piribebuy, al norte con la cuenca del Río Jejuí Guazú y al sur con la cuenca del Río Tebicuary (figura 15) (Chávez et al., 2006).

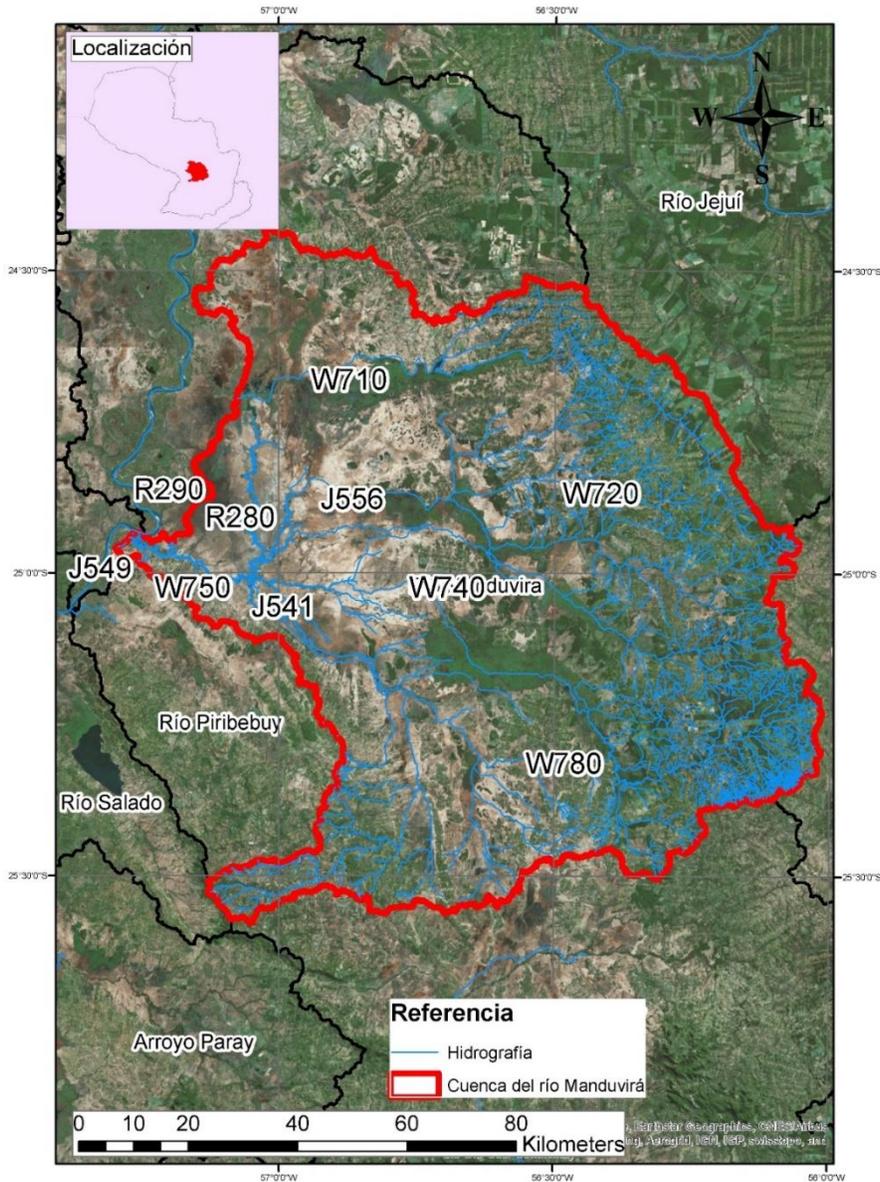


Figura 15. Cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

La Cuenca del Río Manduvirá incorpora tres cursos caudalosos, el Arroyo Tobatiry con su afluente el Arroyo Peguajho, el Arroyo Yhú y el Arroyo Yhaguy al Sur (Toñáñez, 2014).

La red de drenaje compuesta por tributarios de los citados cursos que son alimentados por numerosos esteros y campos bajos que ocupan más del 50 % de la cuenca media (Toñáñez, 2014).

El clima regional corresponde al clima tropical cálido. Las temperaturas son altas en la mayor parte del año siendo la media anual de unos 22 a 23 °C, con una máxima promedio de 28 °C en verano y una mínima promedio de 18 °C en los meses más fríos (año 1997) (Chávez et al., 2006).

El caudal promedio (17 años de registro - Balance Hídrico DINAC) del Río Manduvirá es 136 m<sup>3</sup>/s, equivalente a 456 mm de escorrentía. La precipitación media de la cuenca está en el orden de 1.481 mm/año, con una evapotranspiración de 1.025 mm, lo que confiere a la cuenca la característica de que en ella no se registra déficit hídrico, al contrario hay un excedente importante (Toñáñez, 2014).

### 2.3.3. Programa Utilizado

#### 2.3.3.1. Modelo Hidrológico HEC-HMS

El HEC-HMS es un programa de dominio público, para modelación hidrológica desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) y está diseñado para simular el proceso de precipitación y escurrimiento en cuencas y puede ser aplicado a un amplio rango de regiones geográficas como grandes cuencas sin intervención. Además, los resultados pueden ser aplicados para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervención en cuencas, reducción de daños por inundaciones, operación de sistemas, entre otros.

La aplicación del modelo en este trabajo, esta orientado a obtener hidrogramas de salida de cuencas hidrográficas a partir de datos de precipitación en un periodo de tiempo de 1 o varios años, como simulación continua.

El modelo HEC-HMS simula 4 (cuatro) componentes del ciclo hidrológico, brindando una gran variedad de métodos que pueden ser utilizados para cada componente. La selección de uno u otro método dependerá del tipo de modelo que se quiera crear (de evento o continuo), así como de la calidad y cantidad de datos disponibles.

Estos componentes son los siguientes (Sánchez, 2012):

- a) Vegetación, superficie, pérdidas: esta primera etapa calcula qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa (Precipitación Neta).
- b) Transformación: el programa calcula la escorrentía directa producida por la precipitación neta. Para esta etapa, existen diversos métodos que pueden utilizarse y se ha seleccionado el Hidrograma Unitario de Clark atendiendo a los pocos datos medidos disponibles.
- c) Caudal Base: en esta etapa el programa suma la escorrentía directa a la escorrentía básica (si existía previamente). Calcula la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo. Existe una gran variedad de métodos, pero solo uno trabaja en conjunto con el modelo de pérdidas SMA para simulaciones continuas, el Linear Reservoir.
- d) Tránsito de Avenidas: el programa calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce, o a través de un depósito o embalse y se utiliza el método Muskingum Kunge que se describe más adelante.

Por otro lado, el programa tiene 3 (tres) componentes estructurales (Sánchez, 2012):

- a) Modelo de Cuenca: se brinda la información al programa acerca de las distintas subcuencas y sus características. Estas características son los parámetros asociados a los modelos de pérdidas, transformación, caudal base y tránsito de avenidas.
- b) Modelo Meteorológico: en este componente se asignan los pluviómetros. Los datos de cada pluviómetro son introducidos previamente en el Administrador de las Series de Tiempo.
- c) Especificaciones de Control: en este componente se le indica al programa cuando debe empezar y terminar la simulación, así como el intervalo de tiempo.

### 2.3.3.2. Modelo Hidráulico HEC-RAS

Para la modelación hidráulica del río Paraguay se utiliza el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), que consiste en un Modelo Hidráulico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés). Como se menciona en Fan et al (2014), el proceso de propagación de caudal en cursos de agua es generalmente representado con un conjunto de dos ecuaciones, conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant (1871), o ecuaciones de escurrimiento no permanente unidimensional. Estas ecuaciones se muestran a continuación:

#### Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

#### Ecuación de Cantidad de Movimiento o Ecuación Dinámica

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

Donde:

A = área de la sección transversal al escurrimiento,

Q = caudal que pasa por esa sección,

x = distancia en el sentido longitudinal,

t = tiempo,

q = caudal por unidad de ancho de contribución lateral,

h = profundidad del río,

S<sub>0</sub> = pendiente del fondo del río,

S<sub>f</sub> = pendiente de la línea de energía.

### 2.3.3.3. HEC-DSS

Es una base de datos que ofrece el Centro de Ingeniería Hidrológica, para facilitar la carga de datos de series de tiempo a ser utilizados tanto en el Hec Hms (modelo hidrológico) como el Hec Ras (modelo hidráulico).

#### 2.3.3.4. SOIL GRIDS

Es un sistema de mapeo automatizado del suelo basado en métodos de predicción espacial de vanguardia, ofrece una colección de mapas del mundo de propiedades y clases de suelos actualizables a resoluciones espaciales de 1 km/250m producidas mediante mapas automatizados de suelos basados en algoritmos de aprendizaje automático. Los datos de SoilGrids están disponibles públicamente bajo la licencia Open Data Base.

#### 2.3.3.5. SOIL WATER CHARACTERISTICS

A partir de los contenidos de arena y arcilla, provee las relaciones del contenido hídrico y tensión (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación) y conductividad hidráulica saturada (Ksat) y no saturada, según la clasificación de tipo de suelos del USDA.

#### 2.3.3.6. QGIS

Es un sistema de información geográfica de uso libre, que permite trabajar con mapas e información geográfica en general, y además tiene múltiples aplicaciones para el área de la hidrología.

### 2.3.4. Datos de elevación

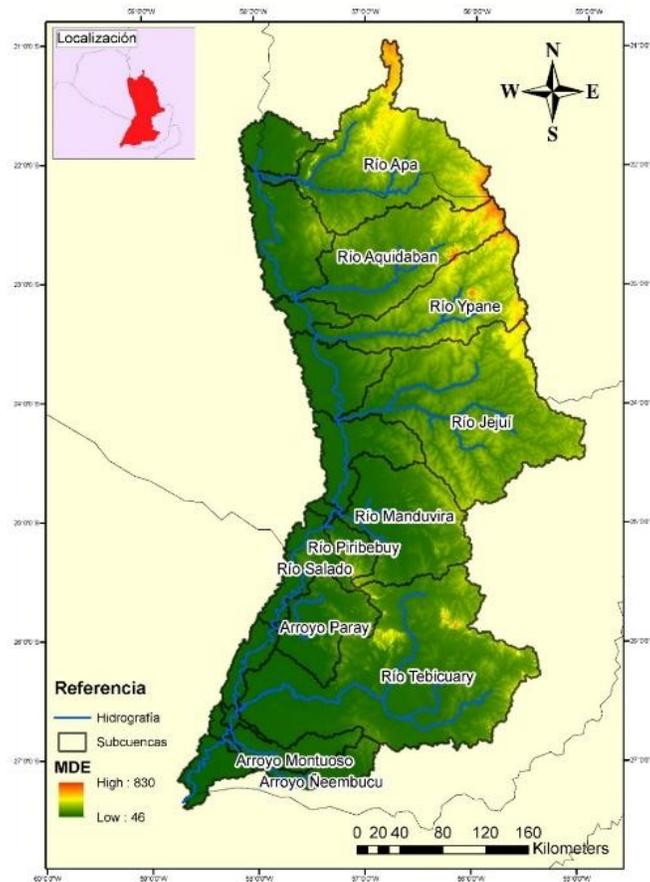
#### 2.3.4.1. Datos de elevación utilizados para el Modelo Hidrológico

Para realizar los análisis iniciales, se utilizó un Modelo de Elevación Digital de toda la cuenca del río Paraguay.

El modelo digital de elevación utilizado es el descargado gratuitamente de la página del CGIAR-CSI por el Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). El modelo utilizado fue el elaborado por la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de la National Geospatial Intelligence Agency (NASA). El mismo tiene una resolución espacial de 90m x 90m.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. En la Figura 16 se observa el MDE utilizado en contraste con las cuencas aportantes al río Paraguay de la Región Oriental.



**Figura 16.** Modelo Digital de Elevación utilizado. Fuente: procesado a partir de datos del SRTM.

### 2.3.4.2. Datos de elevación utilizados para el Modelo Hidrodinámico

#### 2.3.4.2.1. Batimetría en el cauce

Los datos batimétricos utilizados corresponden a Levantamientos Hidrográficos realizados por la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP) en el marco del Proyecto de Dragado del Río Paraguay. Los tramos que cuentan con información batimétrica se muestran en la Figura 17.

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Río Paraguay

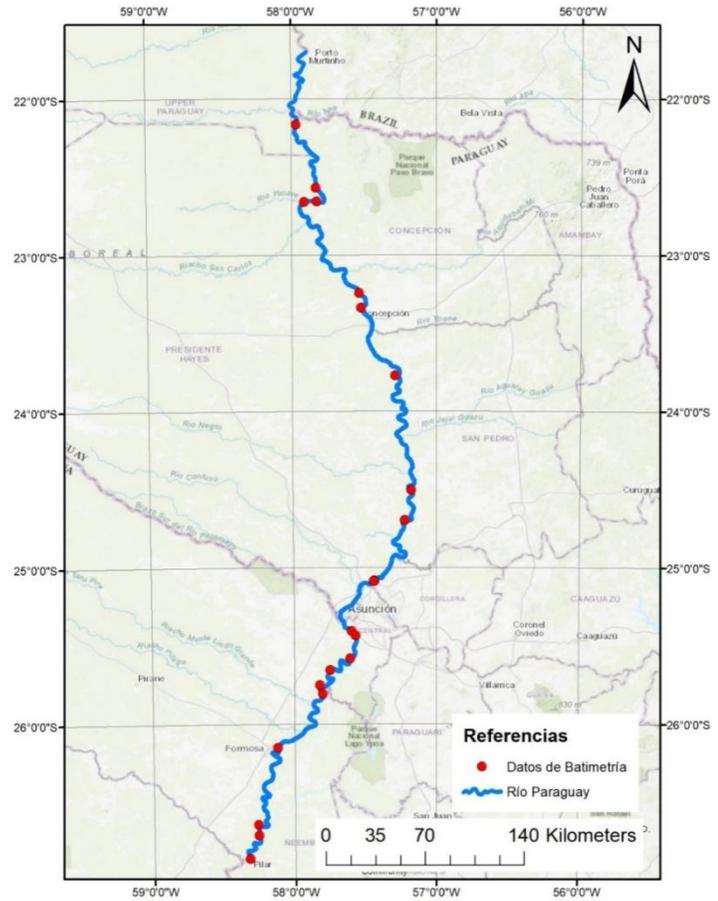


Figura 17. Zonas del Río Paraguay con información batimétrica.

Estos datos son utilizados para representar el cauce del Río Paraguay. Las zonas intermedias (donde no existe información batimétrica) son obtenidas a través de una interpolación lineal a lo largo del eje del río. Esto permite construir un cauce continuo para todo el tramo a ser modelado. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de los datos batimétricos.



Figura 18. Ejemplo de datos batimétricos utilizados.

#### 2.3.4.2.2. Topografía de las planicies de inundación

Para representar lo mejor posible la geomorfología de las planicies de inundación, se utilizó el MERIT SRTM (Yamazaki, et al., 2017), que consiste en un Modelo Digital de Elevación que proviene de un procesamiento realizado sobre el SRTM original (Farr, et al., 2007). De acuerdo a la descripción que realizan los autores, se obtuvieron mejoras significativas respecto al SRTM original, principalmente en regiones planas. Esta mejora se debe a una limpieza de ruidos de distintos tipos, como, por ejemplo, sesgos en la elevación del terreno asociados a la vegetación. Por estas razones, se considera al MERIT SRTM una fuente de información clave para representar las planicies de inundación en Modelación Hidrodinámica. A modo de ejemplo, en la Figura 19 se muestra la mejoría en la representación de las planicies de inundación del Río Amazonas.

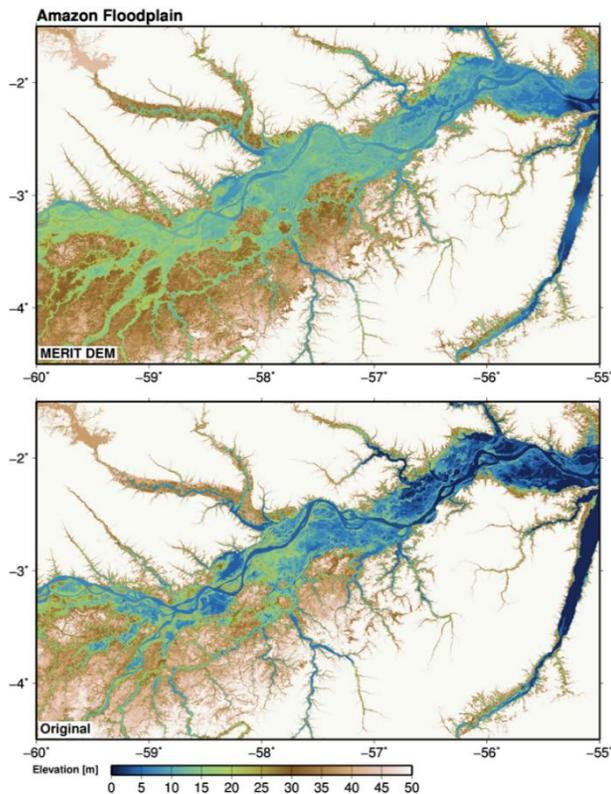


Figura 19. Planicie de Inundación del Río Amazonas. Fuente: (Yamazaki, et. al., 2017).

#### 2.3.4.2.3. Construcción del Modelo Digital del Terreno (MDT)

Con el objetivo de obtener secciones transversales en cualquier sitio del Río Paraguay en el tramo comprendido entre Puerto Murtiño (BR) y Pilar (PY), se realiza una fusión entre el MDE creado a partir de los datos batimétricos (cauce) y el MERIT SRTM (planicies de inundación). En la Figura 20 se observa cómo fue construida la geomorfología del río.

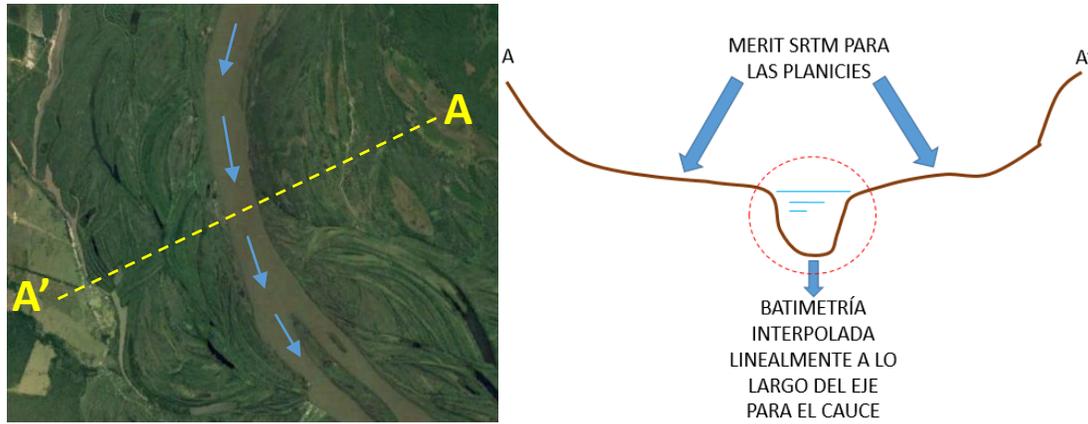


Figura 20. Configuración de la geomorfología del Río Paraguay.

Fusionando estas informaciones, se obtiene un Modelo Digital de Elevación del Río Paraguay con su cauce incluido, tal como se muestra en la Figura 21 y Figura 22.

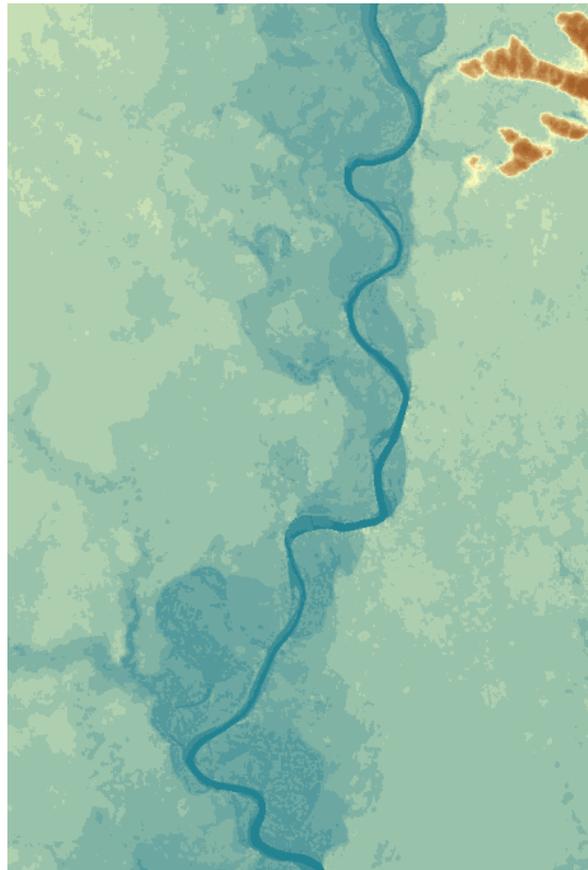


Figura 21. Tramo del Río Paraguay en Planta con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM).

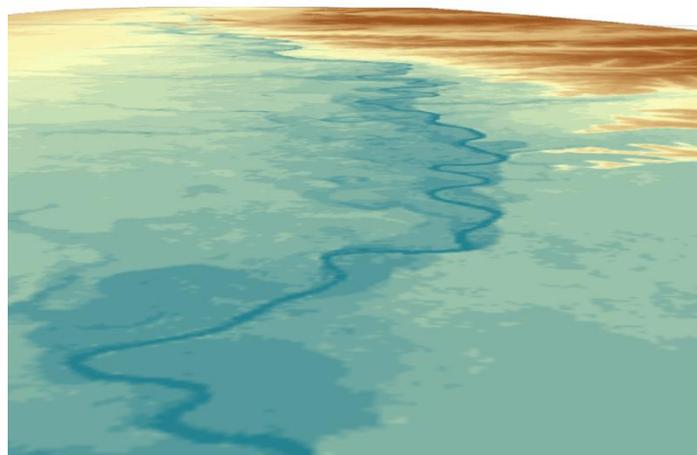


Figura 22. Tramo del Río Paraguay en perspectiva con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM).

### 2.3.5. Datos de Tipo y Uso de Suelo

#### 2.3.5.1. Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT)

El Estudio de Suelos de la Región Oriental del Paraguay en el marco del Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT) se llevó a cabo a través del uso de ampliaciones de imágenes satelitales a escala 1:100.000, cuyo procesamiento y cartografía digital fue realizado por el "Earth Satellite Corporation", de Rockville, Md., EEUU, a partir del "Landsat Thematic Mapper" (TM) - conteniendo las bandas TM 3, 7 y 4, en órdenes azul, verde y rojo-; cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:100.000; trabajo de campo consistente en la descripción de perfiles de suelos de toda la Región Oriental y toma de muestras de suelos; análisis laboratoriales de las muestras de suelos e interpretación y procesamiento de toda la información recolectada. También se caracterizó el clima, la fisiografía-geomorfología y uso actual de la tierra. Este estudio permitió la elaboración de los mapas de Taxonomía de los suelos, de Capacidad de Uso de la Tierra y de Ordenamiento de la Tierra de la Región Oriental del Paraguay. MAG.

El proyecto tuvo como objetivo la realización de un estudio de reconocimiento de suelos y determinación de su capacidad de uso en la Región Oriental del Paraguay, a efectos de sentar las bases para la planificación racional del uso y manejo sustentable de este recurso y la promoción de su ordenamiento territorial (López et al. 1995).

El mapa de suelos de la Región Oriental del país, producido en este estudio, contiene 349 unidades cartográficas, en donde los suelos que las componen pertenecen a 7 Ordenes, 13 Subórdenes, 28 Grandes Grupos y 58 Subgrupos, clasificados por el sistema "Soil Taxonomy", del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1992). Las unidades cartográficas contienen información sobre el tipo de suelos de cada área, en particular, paisaje donde aparece cada suelo, material parental, clase textural, pendiente del terreno, drenaje, pedregosidad y rocosidad. Además, cada tipo de suelos se presenta descrito según sus características morfológicas, químicas, físicas y taxonómicas. Figura 23.

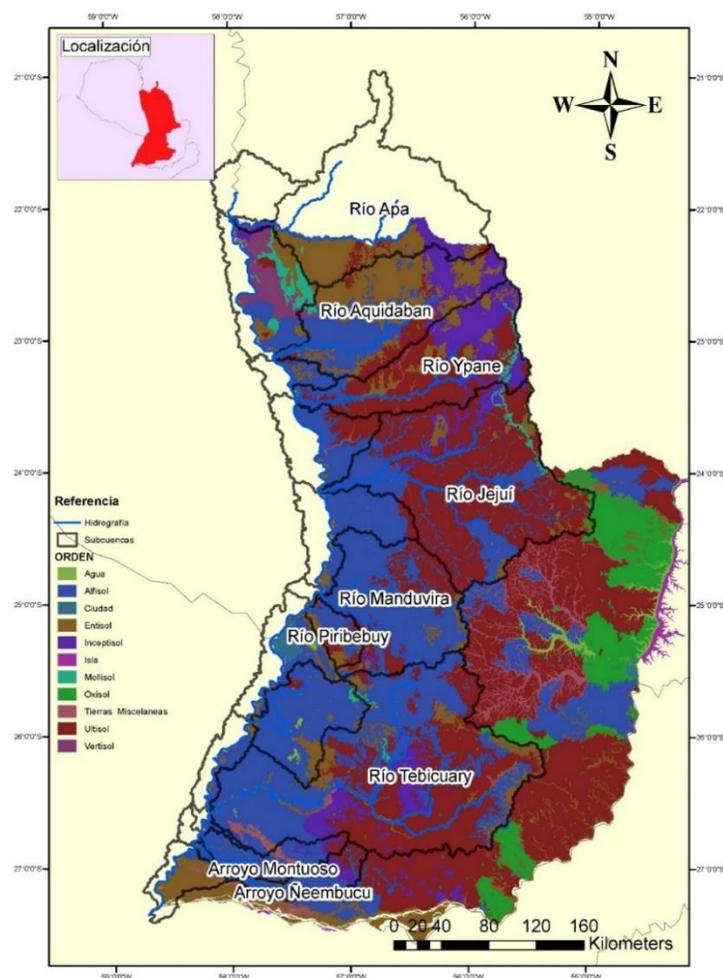


Figura 23. Orden de suelos Región Oriental. Fuente: Elaborado con datos del PRUT (1995).

## 2.3.6. Datos de Series de Tiempo

### 2.3.6.1. Datos de precipitación

Para la generación de caudal de escorrentía, en régimen continuo, se utilizaron datos de precipitación de estaciones administradas por la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC y de la Agencia Nacional de Aguas del Brasil (ANA). Las estaciones y las cuencas en las que fueron utilizadas se detallan en la tabla 2, así como su distribución espacial en la Figura 24.

Tabla 2. Estaciones pluviométricas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Institución	Longitud	Latitud
Asunción	DMH	-57.515	-25.236
Concepción	DMH	-57.43	-23.442
Coronel Oviedo	DMH	-56.378	-25.484
Puerto Casado	DMH	-57.94	-22.283
Paraguarí	DMH	-57.146	-25.627
Pedro Juan Caballero	DMH	-55.833	-22.64
Salto del Guairá	DMH	-54.354	-24.033
San Pedro	DMH	-57.088	-24.085
Santaní	DMH	-56.448	-24.667
Villarrica	DMH	-56.438	-25.754
Bela Vista	ANA	-56.526	-22.109
Caracol	ANA	-57.029	-22.031
Marabá	ANA	-57.358	-21.688
Jardim	ANA	-56.192	-21.471

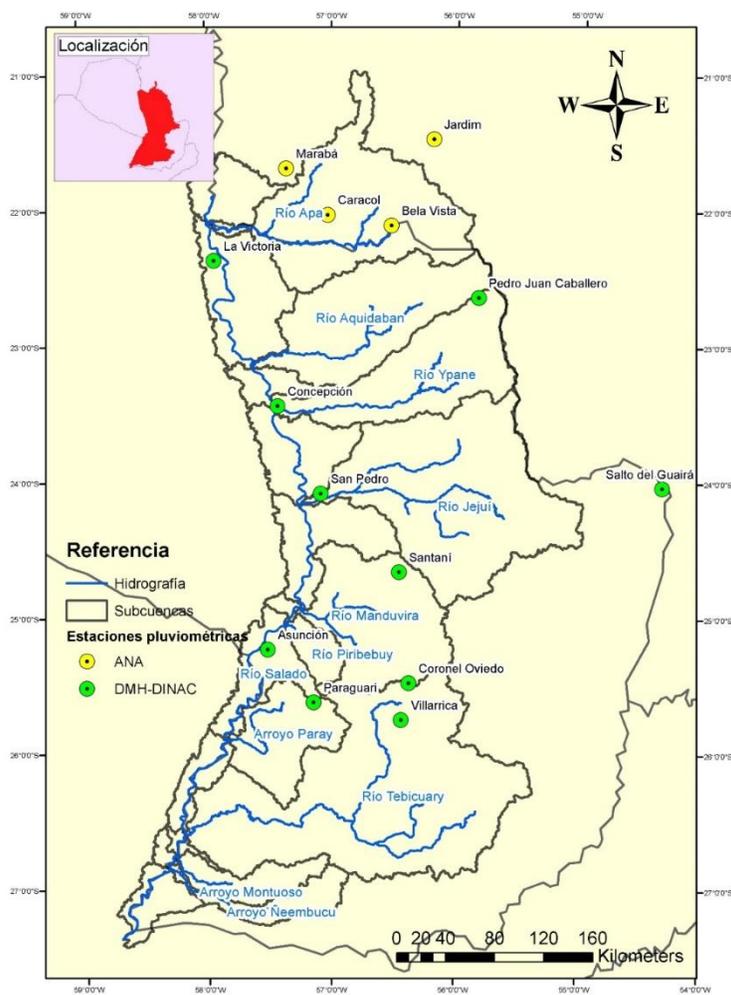


Figura 24. Estaciones pluviométricas utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.6.2. Datos de nivel y caudal

#### 2.3.6.2.1. Datos utilizados para el modelo hidrológico

Para la calibración del caudal calculado por el modelo hidrológico, se utilizaron estaciones hidrométricas ubicadas en los cauces principales de cada cuenca. Para la cuenca del río Apa, se utilizó la estación de São Carlos, administrada por la ANA, la cual dispone de datos de nivel y caudal verificados por la misma entidad, en un periodo desde 1971 al 2013. Para las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá no se tienen datos disponibles de caudal, sin embargo, se cuentan con datos históricos de nivel hidrométrico del Anuario Hidrográfico de la ANNP, con un registro de mediciones del 01/01/1974 al 31/12/1991, los cuales fueron utilizados para la estimación de caudales sintéticos. En la Figura 25, se observa la ubicación de las estaciones durante el periodo de medición detallado.

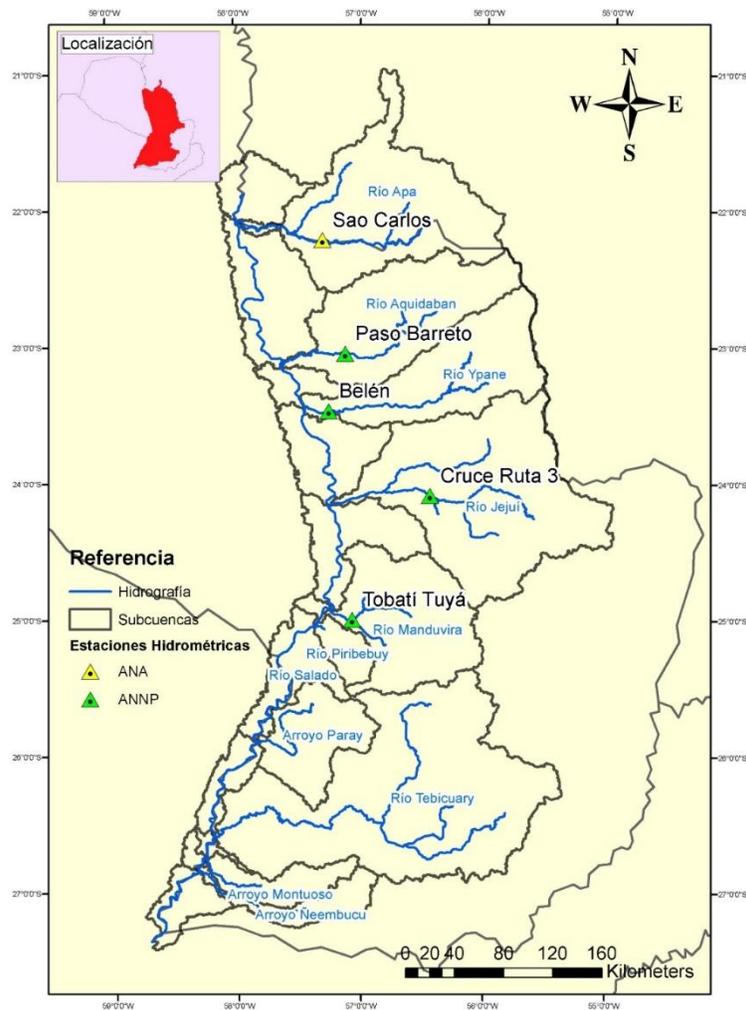


Figura 25. Estaciones hidrométricas utilizadas (ANNP). Elaboración propia.

#### 2.3.6.2.2. Datos utilizados para el modelo hidrodinámico

- Niveles Observados

Los Modelos Hidráulicos requieren datos observados de nivel a lo largo del trecho a simular, lo cual permite ajustar los niveles simulados para que repliquen lo mejor posible la realidad. Para el presente trabajo, se utilizaron datos observados de las estaciones hidrométricas de Vallemí, Concepción, Puerto Rosario, Asunción, Villeta, Alberdi y Pilar, los cuales fueron facilitados por la ANNP. Estos datos se muestran en la Figura 7.

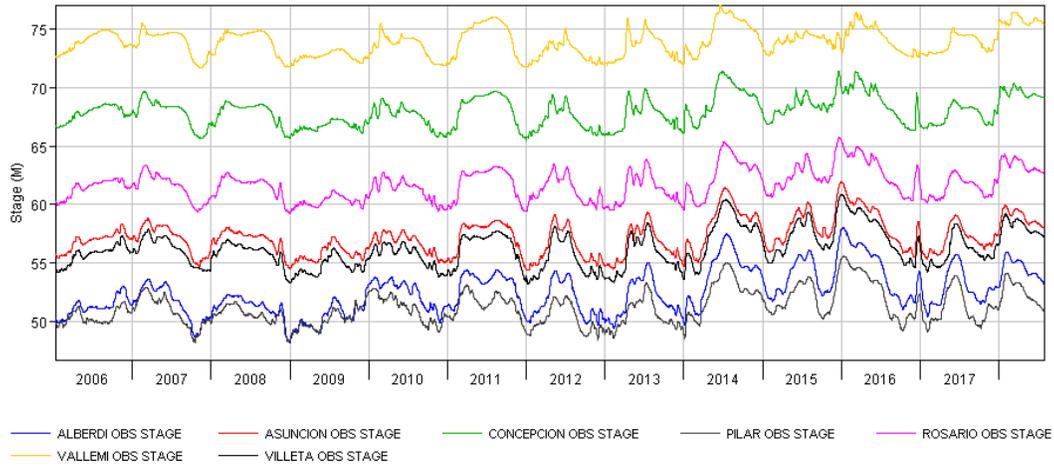


Figura 26. Datos de Niveles Observados. Periodo: 2006 – 2018.

En muchos casos, parte de la serie original de cada estación carecía de datos. Cuando la falta de datos se daba en un periodo relativamente pequeño (pocos días) se optó por una simple interpolación lineal. Sin embargo, cuando la falta de datos se daba en periodos largos (meses) se optó por completar lo faltante mediante correlaciones entre las estaciones hidrométricas utilizadas. En las siguientes figuras se muestran algunas correlaciones utilizadas entre estaciones para completar datos faltantes.

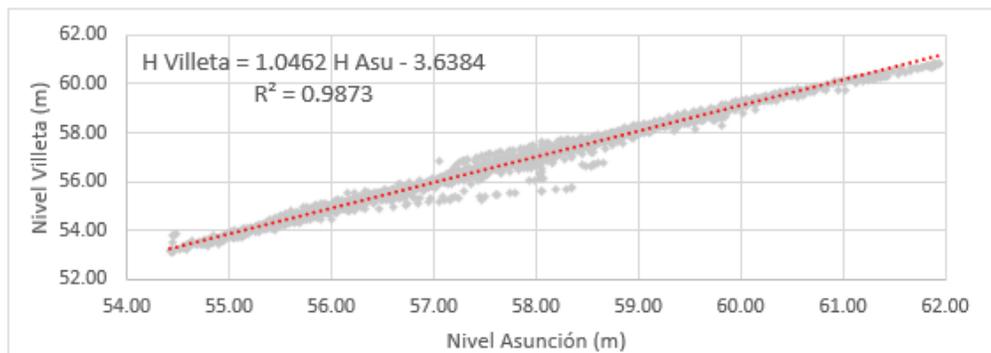


Figura 27. Correlación entre niveles registrados en Asunción y Villeta.

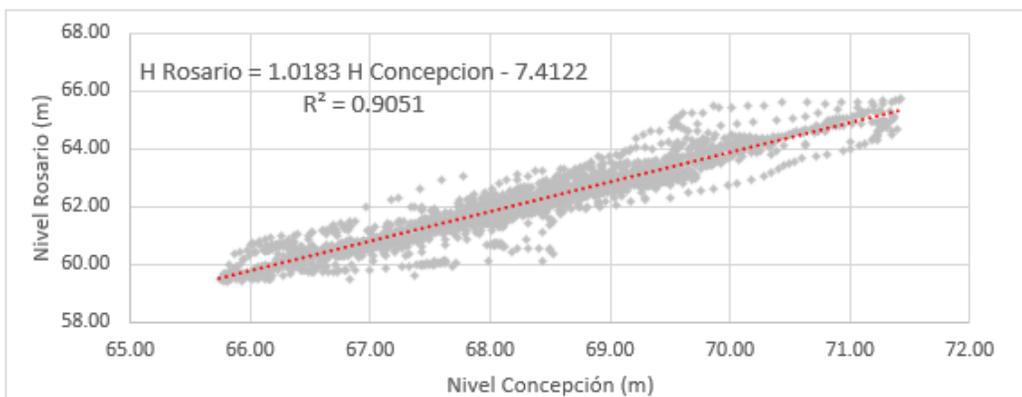


Figura 28. Correlación entre niveles registrados en Puerto Rosario y Concepción.

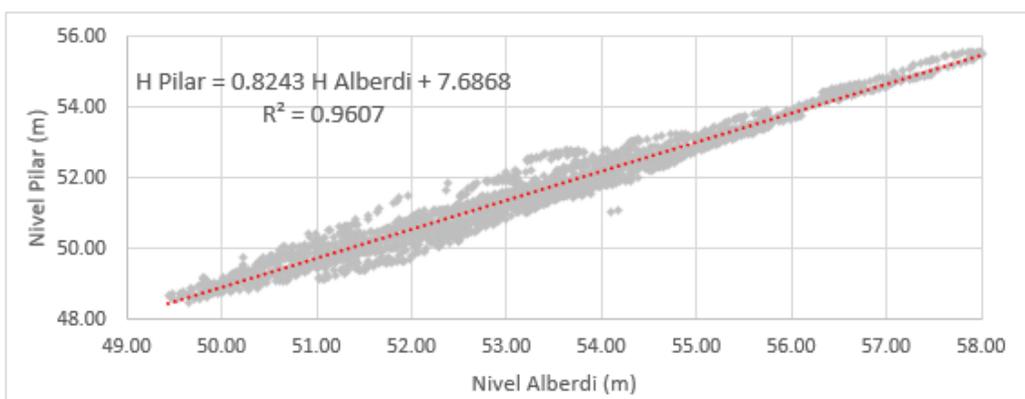


Figura 29. Correlación entre niveles registrados en Alberdi y Pilar.

- **Datos de Caudal**

En la Estación Puerto Murtiño, Brasil, existen datos de caudal medido, con lo cual, es posible construir una Curva H-Q, tal como se muestra en la Figura 30.

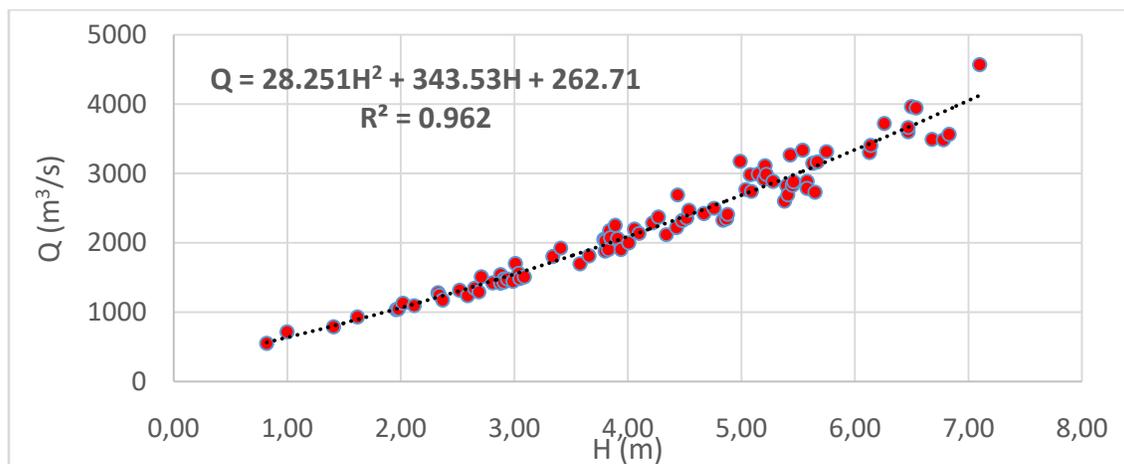
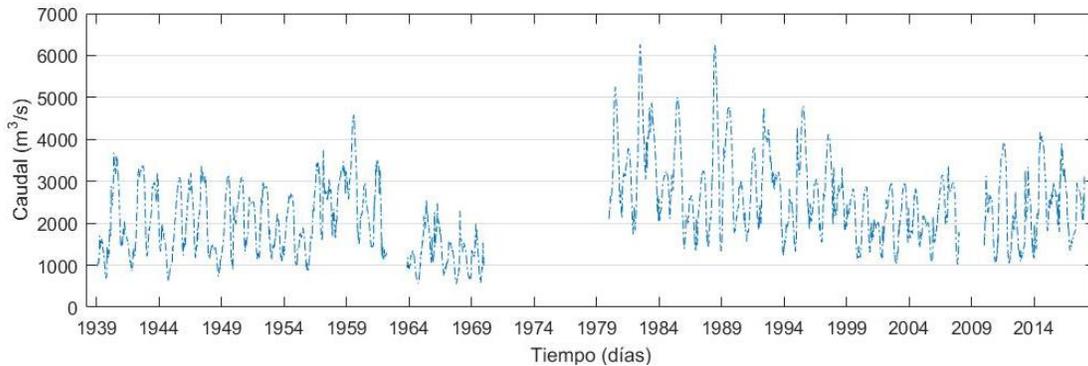


Figura 30. Curva Altura-Caudal en Puerto Murtiño.

Los datos hidrométricos son transformados a caudal mediante la relación que se muestra en la Figura 30, obteniendo la serie de caudales que se muestra en la Figura 31.



**Figura 31.** Serie de Caudal en Puerto Murtiño (Periodo: 1939 – 2018).

Es oportuno aclarar que el Sistema de Hidro Telemetría de la Red Hidrometeorológica Nacional del ANA, pone a disposición en su página web datos verificados de nivel y caudal registrados en la estación Puerto Murtiño. Con esta información, no se requiere la utilización de la curva H-Q en lo que se refiere al Sistema de Previsión del presente trabajo, considerando que directamente se cuenta con información de caudal (controlada y verificada por la ANA).

### 2.3.7. Métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS

A continuación, se describen los métodos utilizados para la estimación de los parámetros que rigen la modelación hidrológica. Estos procesos y la estimación de sus parámetros se realizaron de forma independiente para cada cuenca incluida en el estudio.

#### 2.3.7.1. Modelo de Pérdidas

El método utilizado por el modelo para simulaciones continuas es el Soil Moisture Accounting (Modelo de la Contabilidad de la Humedad del Suelo). Este simula el movimiento y almacenamiento del agua a través de la vegetación, la superficie del suelo, el perfil del suelo y las distintas capas del agua subterránea (Pereira, 2015). En la Figura 32 se observa el proceso realizado por el SMA.

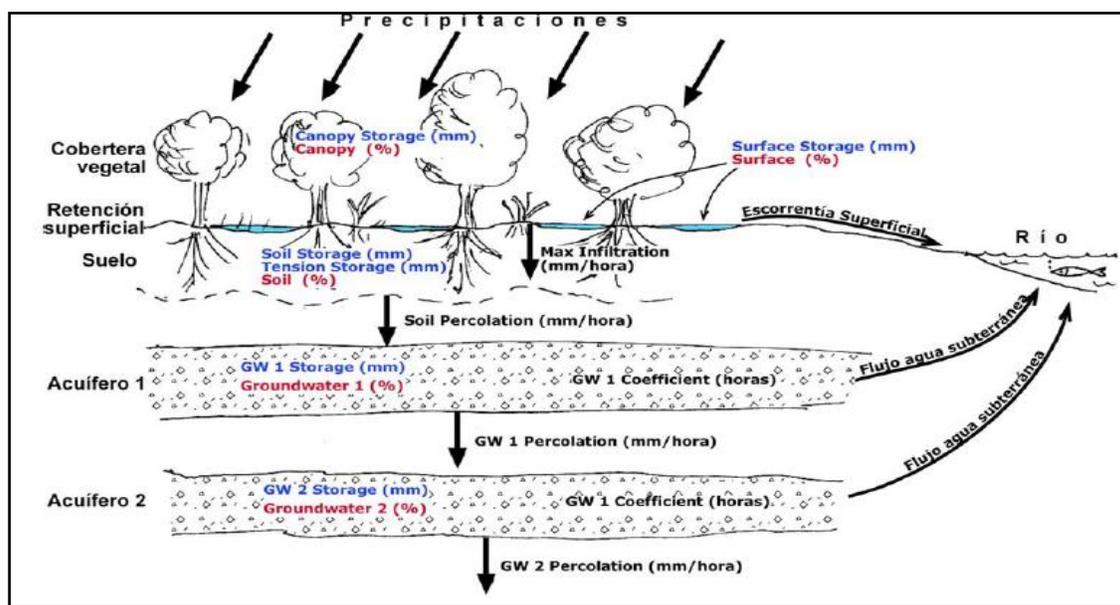


Figura 32. Esquema del Soil Moisture Accounting. Fuente: Manual del Usuario HEC-HMS.

- a) Interceptación en la cubierta vegetal (Interception Canopy): Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada son las precipitaciones y la única salida la evapotranspiración (ET). Mediante el procesamiento de imágenes satelitales, se realizó la clasificación del uso del suelo para cada subcuenca, asignando valores de referencia, de acuerdo a Vélez et al. (2009), mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores asignados a abstracciones iniciales por cobertura vegetal. Fuente: Vélez, 2009.

Descripción	Almacenamiento (mm)	Intercepción (mm)
Bosque	4.5	9
Pastos o hierbas	6	3
Suelos desnudos	1	0
Urbano alta densidad	5	1
Urbano baja densidad	3	2
Agua	0	0

- b) Almacenamiento en depresiones superficiales (Surface depression storage): Es el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno. Se utilizó el criterio de Gaete y Vergara, especificado en el “Manual de diseño de Sistemas de Riego Tecnificado” (2001), porque permite estimar la Capacidad de Infiltración en función a la textura del suelo, y posteriormente aplicar un factor de corrección en función a la pendiente de la superficie.
- c) Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage): La entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas son la ET y la percolación hacia el acuífero subyacente. HMS distingue dos zonas dentro del suelo:

- I. Zona superior (Upper zone): Parte del suelo que puede perder agua por ET o por percolación. Corresponde al agua gravífica, que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por la gravedad.
- II. Zona de tensión (Tension zone): Parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por ET. Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo; las raíces pueden utilizarla, pero no puede moverse. La ET primero toma agua de la Upper zone, y posteriormente de la Tension zone.

Los parámetros solicitados por el SMA fueron posibles de estimar con los datos de textura de suelo, materia orgánica (datos del PRUT y SoilGrids), y la utilización del software Soil Water Characteristics (SWC).

Con el SWC se estima la conductividad hidráulica del suelo, la capacidad de campo y la saturación del suelo, mediante el porcentaje de arcilla, arena y la materia orgánica de cada tipo de suelo. En ausencia de mejor información, la “Máxima Tasa de Percolación del Suelo (mm/hr)” solicitada por el SMA, es asumida como igual a la Conductividad Hidráulica vertical de la superficie del suelo.

Por otra parte, los parámetros “almacenamiento del suelo (mm)” y “zona de tensión (mm)” son asumidos como la saturación y la capacidad de campo (proporcionados por el SWC), respectivamente.

d) Almacenamiento en los acuíferos (Ground water storage): El modelo distingue dos niveles:

Un acuífero más superficial, “GW 1”; que recibe directamente la percolación del agua gravífica que no ha sido atrapada por la ET y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero más superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o percolar hacia un acuífero más profundo “GW2”. Análogamente, desde este acuífero el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea o percolar aún más profundamente; en este caso el modelo considera esta agua perdida, sale del sistema y no es considerada.

Los coeficientes GW1 y GW2, son el tiempo de retardo que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles acuíferos salga lateralmente y alimente al cauce como caudal base.

Las capas subterráneas del subsuelo requieren 6 (seis) parámetros, 3 (tres) parámetros incorporados al primer acuífero y 3 al segundo. Los parámetros estimados son la Capacidad de Almacenamiento (mm) y el Coeficiente (hr) de respuesta de los dos acuíferos. Estos valores se estiman a partir del uso del Soil Grids que nos da los porcentajes de arena y arcilla, para espesores de 1 metro (1000 mm) para el almacenamiento subterráneo 1 (GW1) y 2 metros (2000 mm) para el almacenamiento subterráneo (GW2), luego con el SWC se estima la conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitamiento y saturación.

### 2.3.7.2. Caudal base

Se seleccionó el método de Reservorio Lineal, el cual funciona en conjunto con el SMA y que supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales. El método simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial a través de reservorios.

- Contenido inicial de agua subterránea (GW Initial): Es el caudal inicial, en el momento que el modelo comienza a trabajar.
- Coeficiente de agua subterránea (GW Coefficient): Es el coeficiente de almacenamiento de agua subterránea. El acuífero actúa como un lago o embalse, que recibe y suelta agua, también el acuífero atenúa el caudal y lo retrasa, como en cualquier procedimiento de tránsito de caudales. Este parámetro en horas informa al modelo el tiempo de respuesta de este depósito intermedio que es el acuífero.
- Reservorios de agua subterránea (GW Reservoirs): Simula cada acuífero como un número de depósitos en cadena que provocan la atenuación del caudal que se comenta más arriba. Por omisión aparece 1, que corresponde a la mínima atenuación. Se toma dos reservorios. Teniendo en cuenta la ausencia de datos, los coeficientes de los acuíferos solicitados en este método serán asumidos como iguales a los coeficientes determinados para el método de pérdidas.

### 2.3.7.3. Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark

El método utilizado para el presente trabajo es el Hidrograma Unitario de Clark. Este modelo consiste en un hidrograma unitario sintético, es decir, el hidrograma es estimado de acuerdo con fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca de estudio como el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc. Para el caso del HU de Clark del HEC-HMS, el programa construye una curva de Tiempo vs. Área y la utiliza para desarrollar la translación del hidrograma resultante de una precipitación.

Parámetros solicitados:

- Tiempo de Concentración (hr): se define como el tiempo que tarda una partícula de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de descarga (Fattorelli & Fernández, 2011). El tiempo de concentración define el tiempo máximo de viaje en cada subcuenca (USACE, 2010).
- Coeficiente de Almacenamiento (hr): parámetro que tiene en cuenta el efecto del almacenamiento en la red de cauces de la cuenca (Fattorelli & Fernández, 2011). El coeficiente de almacenamiento es utilizado en el reservorio lineal que mide los efectos del almacenamiento (USACE, 2010).

Para obtener el tiempo de concentración se utiliza la fórmula desarrollada en el Brasil para cuencas rurales medianas y grandes, denominada DNOS (Manual Hidrología Unicamp), teniendo en cuenta la trayectoria de flujo más larga en cada subcuenca y la pendiente media asociada a dicha trayectoria.

La fórmula de DNOS que es la siguiente:

$$T_c = \frac{10}{k} \times \frac{A^{0.3} \times L^{0.2}}{I^{0.4}} \quad (3)$$

Donde:

$T_c$  = tiempo de concentración, en minutos,

$A$  = área de la cuenca en ha,

$L$  = longitud del curso de agua en m,

$I$  = pendiente en %.

$k$  = Depende de las características de la cuenca, conforme se describe:

- Terreno areno-arcilloso, cobertura de vegetación intensa y alta absorción  $K=2$
- Terreno común, cubierto de vegetación y absorción apreciable  $K=3$
- Terreno arcilloso, cubierto de vegetación y poca absorción  $K=4$ .

#### 2.3.7.4. Cálculo de Tránsito de Hidrograma

Para el presente proyecto, se optó por el método de Muskingum-Cunge, que es una técnica de coeficientes no lineales que tiene en cuenta la difusión y amortiguación del hidrograma basado en propiedades físicas del canal y el hidrograma de entrada al tramo.

- **Configuración de la Sección Transversal del canal dado por 8 puntos:** con esta configuración mostrada en la Figura 33, los puntos 3 y 6 representan las orillas izquierda y derecha del canal, respectivamente. Los puntos 4 y 5 se encuentran entre el canal. Los puntos 1 y 2 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado izquierdo, mientras que los puntos 7 y 8 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado derecho.

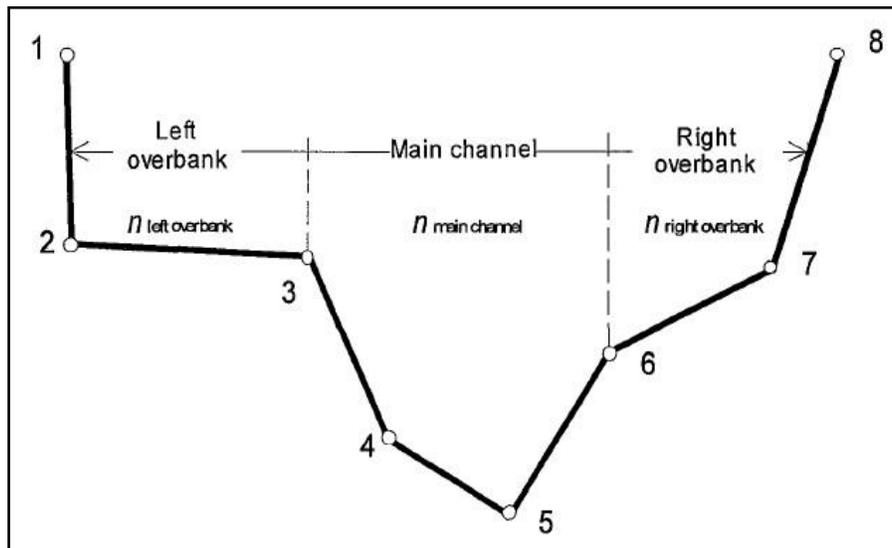


Figura 33. Sección transversal 8 puntos. Fuente: Manual de Ref. Técnicas del HEC-HMS.

La metodología utilizada para determinar los 8 puntos de cada canal a ser modelado en cada cuenca de estudio fue estableciendo secciones transversales al río en el DEM de los satélites

ALOS7 (Advanced Land Observing Satellite), y para obtener el ancho del río se recurrió a Google Earth versión PRO.

La profundidad de canal asumida fue de 6m para el primer canal colector aguas arriba, aumentando progresivamente en los siguientes tramos.

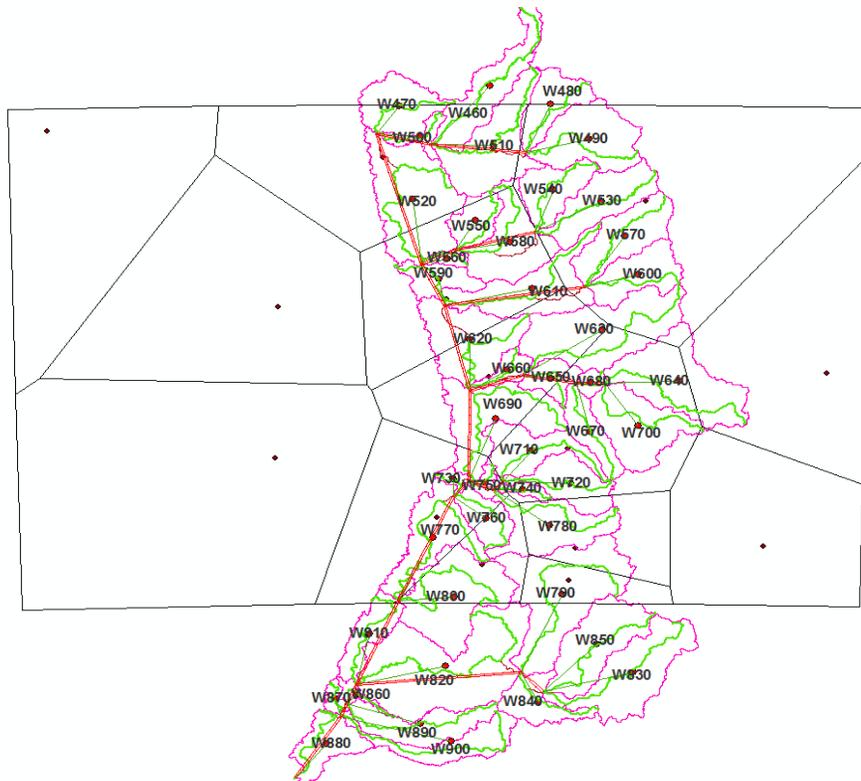
Los parámetros físicos, como la longitud y pendiente de los cauces fueron obtenidos mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica.

Los valores de Manning tanto para el canal principal como para las planicies de inundación, fueron seleccionados a partir de valores estimados por V. T. Chow (1964) según características del cauce y de las planicies de inundación, mediante inspección visual de imágenes satelitales.

### 2.3.7.5. Distribución de precipitación

En general, la altura de lluvia (mm) que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Las estaciones pluviométricas registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como puede ser una cuenca (Aparicio, 1992).

La distribución de precipitación media en la cuenca fue realizada mediante el método de los Polígonos de Thiessen. Este método asigna un peso a las Estaciones Pluviométricas en cada subcuenca (Figura 34).



**Figura 34.** Polígonos Thiessen procesados para distribución de precipitación. Elaboración propia

Es importante aclarar que las asignaciones de pesos por el método de Thiessen no es una tarea de total precisión, por ello, modificar los pesos durante la calibración del modelo podría mejorar el resultado (Fattorelli & Fernández, 2011).

### 2.3.7.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie de suelo y la transpiración de la vegetación. Los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor mediante el viento. Además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. (Chow, 1994)

Numerosas fórmulas nos permiten evaluar la ETP con una aproximación suficiente para muchos estudios hidrológicos. Para este trabajo se utilizó el método de Thornthwaite, los datos necesarios son; de temperatura y de la latitud por una tabla se obtiene el nº teórico de horas de sol.

$$ETP \text{ (mm/mes)} = 16 \left(\frac{l}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(10 \frac{T_a}{l}\right)^a \quad (4)$$

Donde:

$l$  = Duración del día (Hr)

$N$  = nº de días en un mes

$T_a$  = Temperatura del aire media mensual (°C)

$$a = (6,75 \times 10^{-7}) * I^3 - (7,71 \times 10^{-5}) * I^2 + (1,79 \times 10^{-2}) * I + 0,492$$

$I = \sum_1^{12} i$  para los 12 meses, donde  $i$  es índice de calor mensual.

$$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514}$$

### 2.3.7.7. Estimación de caudales sintéticos

Teniendo en cuenta que, a excepción del río Apa, no se cuentan con datos observados de caudal en los cauces, por lo que para la calibración de las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá, se recurrió primeramente a la estimación de caudales sintéticos a partir de datos de nivel observados, recolectados del anuario hidrográfico ANNP. Para ello, se recurrió al Método Área Pendiente, que para el caso en el que ocurren grandes eventos de crecidas, puede estimar el flujo a través de métodos indirectos, con valores de niveles medidos, y estimaciones de parámetros físicos (a través de observación de imágenes satelitales) de las áreas de las secciones transversales (se asumen secciones trapezoidales para el presente caso), la pendiente de los canales, entre otros (figura 35).

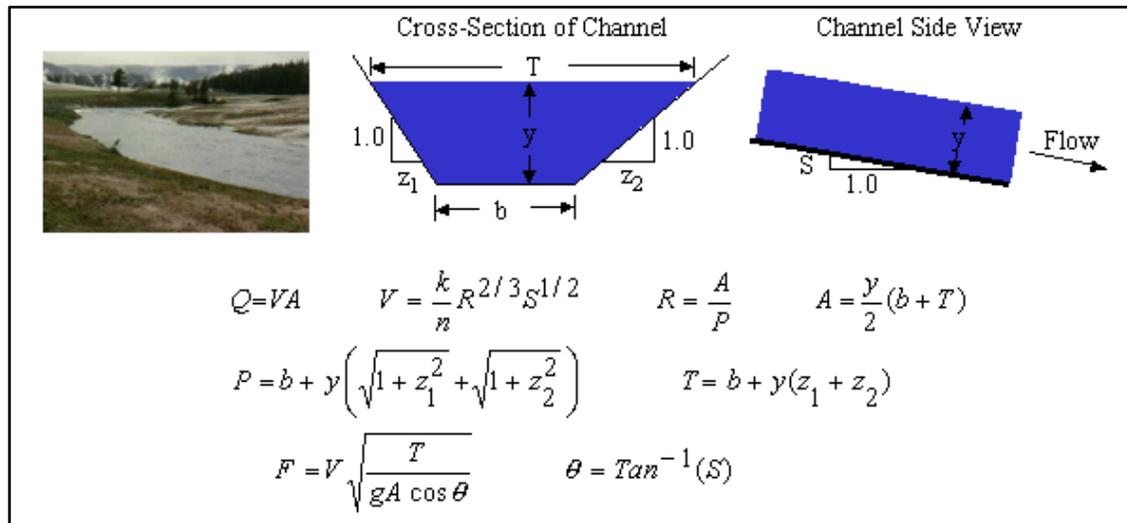


Figura 35. Área trapezoidal del canal.

Donde:

$y$  = Nivel

$T$  = Ancho superficial =  $b + y(z_1 + z_2)$

$Z$  = Talud

$b$  = ancho del canal

Luego, se introducen estos valores en la ecuación de Manning para estimar el flujo, la cual es:

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (5)$$

Donde:

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ ).

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning, estimados a partir de Ven Te Chow, 2004.

$A$  = Área de la sección transversal.

$R$  = Radio hidráulico, equivalente al área dividida por el perímetro mojado.

$S$  = Pérdida de carga por unidad de longitud del canal, aproximado por la pendiente del canal.

Para definir el radio hidráulico, se tiene que:

$$R = \frac{A}{P} \quad (6)$$

Donde:

$A$  = Área de la sección transversal

$R$  = Radio hidráulico, equivalente al área dividido por el perímetro mojado

$P$  = Perímetro mojado

A su vez, se define el área y perímetro de un canal con sección trapezoidal:

$$A = \frac{y}{2}(b + T) \quad (7)$$

$$P = b + y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2}) \quad (8)$$

Donde:

$y$  = Nivel

$b$  = Ancho del canal

$T$  = Ancho superficial

$Z_1 = Z_2$  = Taludes en la sección transversal del canal (cauce)

En la mayoría de los cursos hídricos menores, el coeficiente de rugosidad de Manning se encuentra entre 0,010 y 0,075. Si los valores estimados de  $n$ ,  $A$ ,  $R$ , y  $S$  son razonables, la ecuación de Manning puede ser utilizada para estimar el caudal de descarga que ha ocurrido durante un periodo de aguas altas. (W.J. and Lewis, 2003).

Los caudales sintéticos medios se estimaron mediante la optimización de los parámetros en la ecuación de Manning teniendo en cuenta la sección en el lugar de medición de los niveles en régimen permanente y tomando como datos de control caudales estimados en la bibliografía. Este proceso se muestra en detalle en la sección de calibración para cada cuenca.

### 2.3.8. Criterios utilizados para el montaje y puesta en marcha del Modelo Hidrodinámico

#### 2.3.8.1. Geometría

Para la generación de la geometría del modelo se utilizó el HEC-GeoRAS, que consiste en un complemento SIG para desarrollar toda la configuración de secciones transversales. Básicamente, se define la ubicación y la extensión de las secciones transversales de tal manera a representar lo mejor posible la variabilidad del río a lo largo del trecho de simulación.

#### 2.3.8.2. Espaciamiento entre secciones transversales

Para el presente trabajo se utilizó el criterio de Samuels (1990), que para modelos hidrodinámicos no permanentes sugiere seguir las siguientes recomendaciones o criterios:

##### a. Criterio del Ancho de Río

$$\Delta x \approx kB \quad (9)$$

Donde:

$\Delta x$  = espaciamiento entre secciones

$B$  = ancho del río operando a banca llena

$k$  = constante cuyo valor oscila entre 10 y 20

b. Criterio de los efectos de remanso en régimen subcrítico

$$\Delta x < 0.2 \frac{(1-F^2)D}{s} \approx 0.2 \frac{D}{s} \text{ cuando } F^2 \rightarrow 0 \quad (10)$$

Donde:

$D$  = profundidad del río operando a sección llena

$s$  = pendiente media del cauce principal

c. Criterio de Propagación de Onda

$$\Delta x < \frac{cT}{N_{gp}} \quad (11)$$

Donde:

$T$  = Periodo de la onda

$c$  = Velocidad de la onda

$N_{gp}$  = número de puntos en la grilla (generalmente entre 30 a 50)

De acuerdo a estos criterios, se calculan valores aproximados de espaciamiento entre secciones, tal como se muestra en la Tabla 43.

**Tabla 4.** Espaciamiento entre Secciones Transversales para distintos criterios.

ANCHO	
B (m)	1000
k	15
$\Delta X$ (m)	15000
REMANSO	
F	0
D (m)	10
S (m/m)	0.00005
$\Delta X$ (m)	40000
PROPAGACIÓN DE ONDA	
C (m/s)	0.46
T (seg)	1296000
$N_{gp}$	40
$\Delta X$ (m)	<b>14904</b>

Estos valores indican que el espaciamiento entre secciones transversales debería fijarse en valores inferiores a 14904 m. En base a estas consideraciones, se estructuró la ubicación de las secciones transversales, tal como se muestra en la Figura 17.

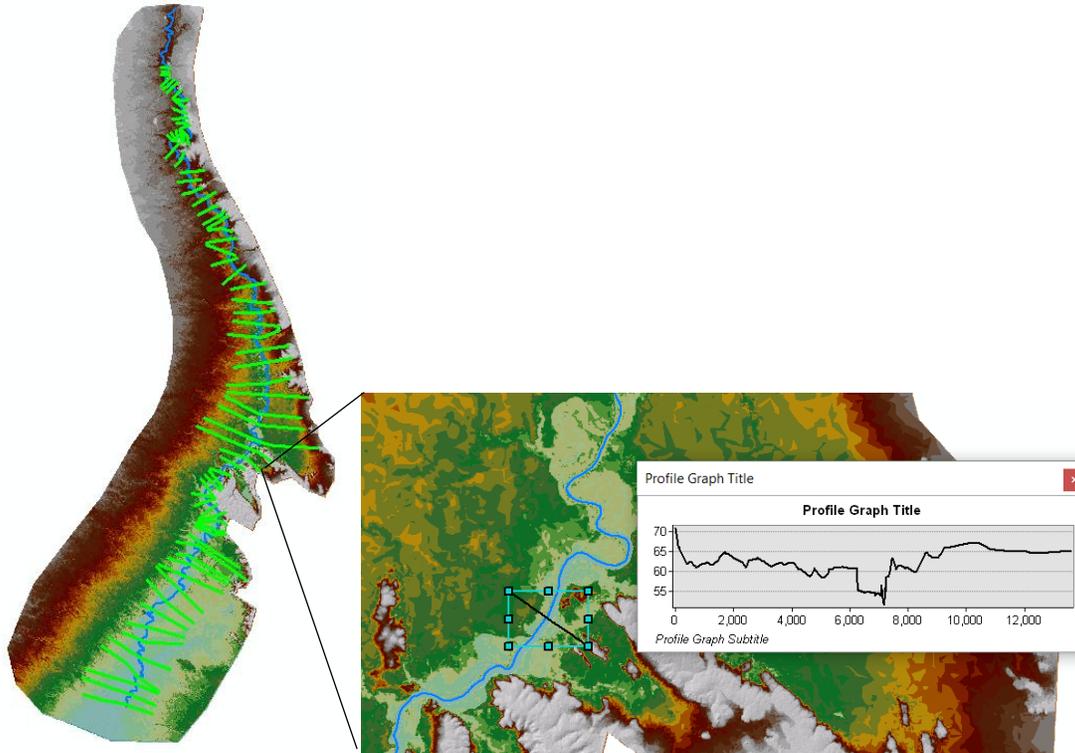


Figura 36. Secciones transversales trazadas sobre el MDE (líneas verdes).

Las condiciones de borde y los datos observados son asociados a algunas secciones transversales del modelo. En las siguientes tablas se muestran las secciones transversales seleccionadas para incluir los datos observados y las condiciones de borde.

Tabla 5. Datos Observados y Secciones Transversales asociadas.

ESTACIÓN	SECCIÓN (HEC-RAS)	USO	CERO HIDROMÉTRICO
Porto Murтинho	883030	Caudal del Río Paraguay	71.46
Vallemi	808030.7	Nivel Observado p/ Calibración	70.39
Concepción	603968.7	Nivel Observado p/ Calibración	64.42
Rosario	448034.6	Nivel Observado p/ Calibración	58.34
Asunción	289274	Nivel Observado p/ Calibración	54.04
Villeta	256579	Nivel Observado p/ Calibración	52.86
Alberdi	123083	Nivel Observado p/ Calibración	48.19
Pilar	1750.016	Nivel Observado p/ Condición de Borde	46.46

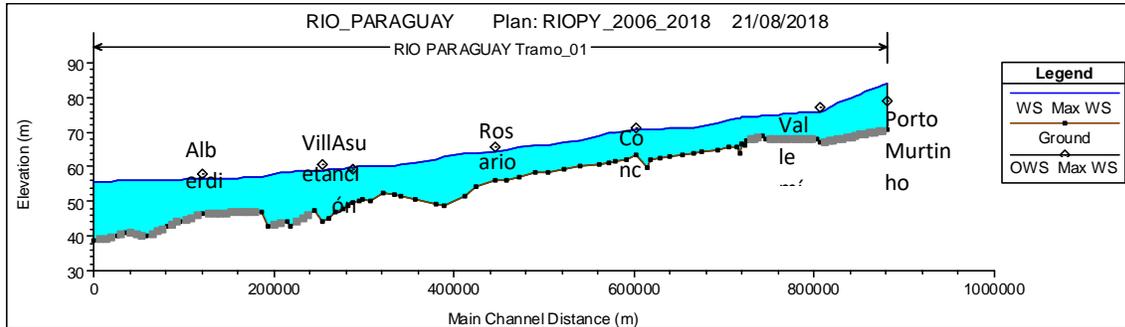


Figura 37. Perfil Longitudinal del Río Paraguay en el entorno HEC-RAS.

Tabla 6. Aportes Laterales y Secciones Transversales asociadas.

SECCIÓN (HEC-RAS)	INGRESO DE CAUDAL
814030	Río Apa
630056.7	Río Aquidabán
579908.6	Río Ypané
459962.3	Río Jejuí
343592.6	Río Manduvirá

### 2.3.8.3. Valores de Rugosidad de Manning

En modelación hidráulica, uno de los parámetros más sensibles es el coeficiente de rugosidad de manning. Este valor depende de diversos factores, como el material del lecho, la cobertura vegetal existente, entre otros. En la literatura especializada existen diversas tablas y criterios para estimar este valor. Uno de los criterios más conocidos es el método de cowan (ec. 6), que básicamente consiste en una ponderación del valor manning de acuerdo a varias características del cauce, tal como se muestra en la Tabla 7.

$$n_{canal} = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (12)$$

Tabla 7. Valores de manning para canales (Ven Te Chow, 1959).

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Tierra	n0	0.02
	Corte en roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n2	0
	Ocasionalmente Alternante		0.005
	Frecuentemente Alternante		0.01 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n3	0
	Menor		0.01 - 0.015
	Apreciable		0.02 - 0.03
	Severo		0.04 - 0.06
Vegetación	Baja	n4	0.005 - 0.01
	Media		0.01 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.05
	Muy Alta		0.05 - 0.1
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

La selección de una rugosidad base para el Río Paraguay fue realizada asumiendo que se trata de un río con lecho de tierra, grado de irregularidad suave, variaciones en la sección transversal gradual, efectos de obstrucciones insignificantes, vegetación baja y efecto de meandros menor. Con estas características, la aplicación del método de Cowan sugiere que  $n_{canal} = 0.025$ .

Respecto a la rugosidad de las planicies de inundación, se utiliza el criterio que se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Valores de Manning para planicies de inundación (Ven Te Chow, 1959).

PLANICIES DE INUNDACIÓN	Mínimo	Normal	Máximo
a. Pastizales, sin matorrales			
<b>Pasto Corto</b>	0.025	0.03	0.035
<b>Pasto Alto</b>	0.03	0.035	0.05
b. Áreas Cultivadas			
<b>Sin Cultivo</b>	0.02	0.03	0.04
<b>Cultivos en línea maduros</b>	0.025	0.035	0.045
<b>Campos de cultivo maduros</b>	0.03	0.04	0.05
c. Matorrales			
<b>Matorrales dispersos, mucha maleza</b>	0.035	0.05	0.07
<b>Pocos matorrales y árboles, en invierno</b>	0.035	0.05	0.06
<b>Pocos matorrales y árboles, en verano</b>	0.04	0.06	0.08
<b>Matorrales medios a densos, en invierno</b>	0.045	0.07	0.11
<b>Matorrales medios a densos, en verano</b>	0.07	0.1	0.16
d. Árboles			

Sauces densos, rectos y en verano	0.11	0.15	0.2
Terreno Limpio, con troncos sin retoños	0.03	0.04	0.05
Terreno Limpio, con troncos con retoños	0.05	0.06	0.08
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por encima de las ramas	0.1	0.12	0.16

Para el Río Paraguay, se consideran valores asociados a matorrales medios a densos, tanto en verano como en invierno. Se adopta un valor  $n_{planicies} = 0.08$ .

Es importante considerar que los valores del coeficiente de rugosidad de manning que fueron estimados son tan solo una base, y pueden ser ligeramente inferior o considerablemente superior de acuerdo al caudal que fluye por el río. Estas variaciones del valor de  $n$  manning de acuerdo al caudal son obtenidas en el periodo de calibración, de tal manera a conseguir un ajuste del modelo hidráulico que sea lo más representativo posible a la realidad.

### 2.3.9. Calibración

Básicamente, el proceso de calibración consiste en la modificación de ciertos parámetros de un modelo con el objetivo de que los resultados simulados repliquen lo mejor posible la realidad.

En cuanto a la modelación hidrológica, una vez estimados los parámetros iniciales para cada cuenca, se inicia el proceso de calibración, el cual consiste esencialmente en ajustar dichos parámetros, mediante un proceso iterativo, de manera a que el caudal calculado por el modelo replique de la mejor forma posible los caudales observados.

Los periodos de calibración para las cuencas se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de datos de precipitación y caudal/nivel observados en las estaciones utilizadas, de forma a que exista una consistencia entre ellos en un mismo periodo.

En el caso de un modelo hidráulico, esto significa un ajuste de parámetros (principalmente la rugosidad) para que los niveles simulados repliquen lo mejor posible los niveles observados.

Teniendo en cuenta la distribución de estaciones que cuentan con registros de nivel a lo largo del Río Paraguay, se identificaron 7 (siete) trechos de calibración, tal como se muestra en la Figura 38 y en la Tabla 9.

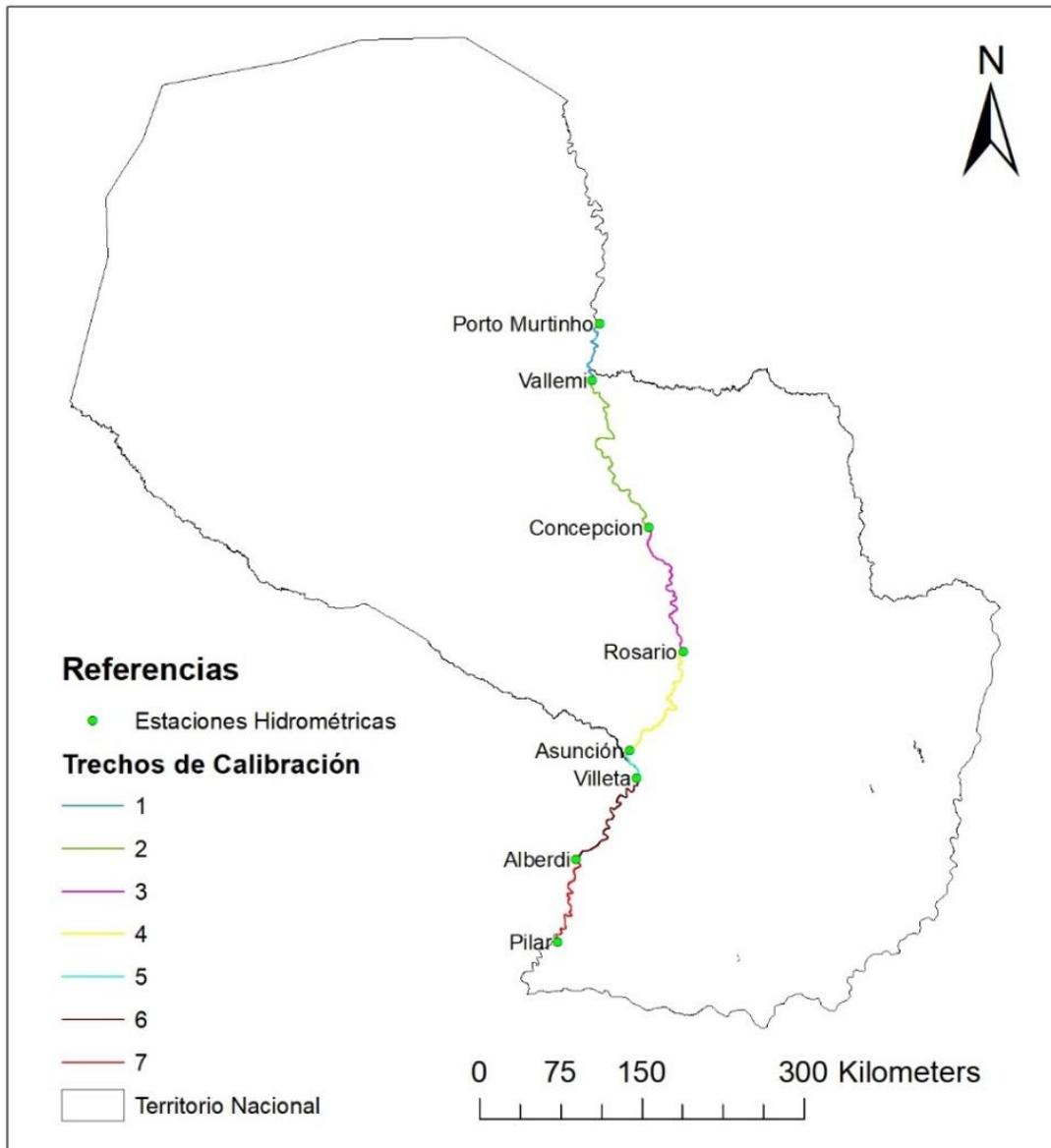


Figura 38. Trechos de calibración del modelo.

Tabla 9. Trechos de Calibración y Secciones Transversales Asociadas.

TRECHO DE CALIBRACIÓN	Estación Inicial	Estación Final
Trecho 1: Vallemí	808030.7	615925.3
Trecho 2: Concepción	603968.7	459962.3
Trecho 3: Rosario	448034.6	296526.8
Trecho 4: Asunción	289274	262573.4
Trecho 5: Villeta	256579	137288.8
Trecho 6: Alberdi	123083	1750.016

Estos trechos de calibración tendrán distintos factores de rugosidad de acuerdo al caudal, de tal manera a replicar lo mejor posible los niveles observados en todas las estaciones hidrométricas disponibles. El periodo de calibración seleccionado es 2012 – 2018 (7 años).

## 2.4. Operacionalización de Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH)

### 2.4.1. YRATO

El CIH cuenta con un aplicativo WEB, denominado YRATO, que permite el monitoreo en tiempo cuasi-real (NRT) de variables hidrológicas para los principales ríos del Paraguay (Vera & Vázquez, 2018). El aplicativo se caracteriza por hacer empleo de software libre y datos abiertos, todos estos mediante automatización de tareas. A continuación algunas características de la herramienta:

- Monitorear en tiempo real (RT) los estados hidrométricos de los principales ríos del Paraguay, mediante información disponibilizada por instituciones varias.
- Permite supervisar el progreso de la precipitación en tiempo cuasi-real (NRT), utilizando información de detección remota del proyecto Global Precipitation Measurement (GPM), de las agencias NASA-JAXA
- Permite observar pronósticos de precipitación, temperatura y humedad de suelo del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
- Permite Realizar estadísticas periódicas de la precipitación (GPM y ECMWF) por áreas (departamentos, localidades, cuencas, etc).
- Utilizar información del proyecto colaborativo Openstreetmap
- Mapeo y cuantificación de áreas afectadas para las ciudades de Concepción, Asunción, Alberdi y Pilar
- Permite la carga de capas de datos geoespaciales
- Administración de datos, insumo de información a la base de datos del CIH
- Análisis de sesgo entre precipitación del GPM y estaciones con pluviómetros.

La gran capacidad de recolección de datos hidrometeorológicos con que cuenta la herramienta a nivel país, representa una alternativa ideal para el acople de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos realizados sobre el Río Paraguay, posibilitando llegar a operacionalizarlos de forma sistémica. De esa manera, profesionales del CIH procedieron al diseño e implementación de procesos automatizados para las corridas diarias de los modelos, obteniendo y disponibilizando previsiones de niveles y caudales con un horizonte de 12 días a lo largo del Río Paraguay.

### 2.4.2. Acople y operacionalización de los modelos desarrollados

Se desarrollaron rutinas y funcionalidades para la automatización y operacionalización del modelo hidrológico e hidráulico confeccionado en el presente estudio. Se incorporan datos de la red hidrológica del país, de teledetección y previsión meteorológica con un horizonte de hasta 12 días. Los modelos generan resultados diariamente y estos poseen un esquema de notificación que permiten informar a instituciones claves sobre la evolución del comportamiento del río. En la

figura 39, se observa de manera esquemática los procesos que permiten acoplar y operar automáticamente a los modelos hidrológicos existentes.

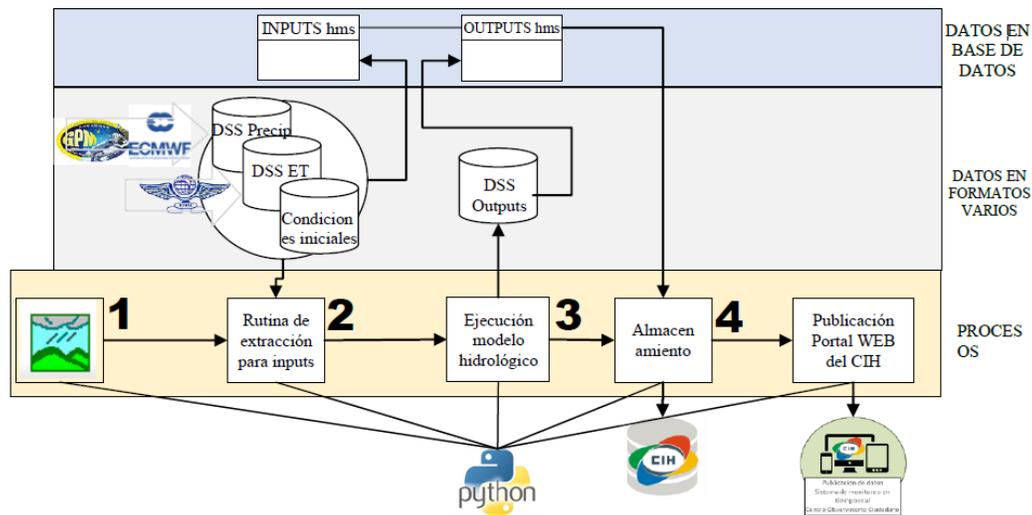


Figura 39. Esquema simplificado de procesos para automatización de los modelos hidrológicos

El proceso consiste en:

1. Obtener modelos: Reconocimiento de 5 modelos hidrológicos desarrollados dentro del marco del proyecto 14-INV-280 CTA/UC-CONACYT, correspondientes a los aportes incrementales del río Paraguay, para cada sub cuenca.
2. Captura de datos: cada modelo hidrológico está compuesto de series temporales de precipitación, evapotranspiración y condiciones iniciales de variables de estado del método Soil Moisture Accounting, este último se alimenta de ejecuciones previas del modelo hidrológico. Datos de precipitación provienen de ponderaciones areales por subcuenca, de la base de datos del proyecto Global Precipitation Measurement (GPM) y del Modelo Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio. Los datos de entrada son transformados a formato compatible para hec-hms (DSS).
3. Ejecutar modelo: Los 5 modelos hidrológicos son ejecutados de manera secuencial en batch (líneas de comando), con tareas programadas y a paso diario (operacionalmente).
4. DSS a BD CIH: todos los outputs en DSS son insertados a la base de datos del CIH, para la visualización en el portal web y para su posterior uso en el modelo hidrodinámico.

Por su parte, el proceso aplicado se muestra en la figura 39, el cual consistió en:

- Obtener modelos: Reconocimiento del modelo hidrodinámico desarrollado en el presente estudio, desde Puerto Murtiño hasta Pilar.
- Captura de datos: Se emplean series temporales de caudal y nivel observado como condiciones de borde, y series de modelado del aporte hidrológico (paso 3). Para la previsión de condición de borde se emplea la hipótesis de condiciones permanentes de nivel y caudal, lo que permite pronosticar niveles y caudales hasta el periodo de transito de la onda de crecida. Los datos de entrada son transformados a formato compatible para hec-ras (DSS).

- Ejecutar modelo: El modelo hidrodinámico es ejecutado posterior a la finalización de todos los modelos hidrológicos, con tareas programadas y a paso diario (operacionalmente).
- DSS a BD CIH: todos los outputs en DSS son insertados a la base de datos del CIH, para la visualización en el portal web.

## 2.5. Evaluación de modelos estocásticos para previsión de niveles del río Paraguay en Asunción

### 2.5.1. Generalidades

Desde la década de los años ochenta, se ha estado utilizando métodos de correlación lineal para estimar el comportamiento futuro del nivel del río Paraguay basado en un punto de control aguas arriba. “Estos métodos solo permiten tener una idea de traslación lineal de la onda de crecida, por lo que si se generan lluvias importantes en las cuencas intermedias, las mismas no son contempladas en la ecuación de regresión lineal, y por lo tanto, los resultados son alterados sustancialmente”. (Báez, Julián. Marzo 2017. 1er informe técnico de avances del proyecto: "Pronóstico de niveles y caudales del río Paraguay hasta 60, 90 días". p.18).

Actualmente, para la previsión de niveles en Asunción, en la dirección de Pronósticos Hidrológicos de la DMH-DINAC, correlacionan puntos de esta misma estación atendiendo la influencia de los fenómenos “La Niña” y “El Niño” (Pastén, 2018).

Utilizar métodos no empíricos de previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay es importante para poder tomar decisiones a tiempo, en los casos de inundaciones, que implicarían posteriormente el desplazamiento de familias, y las respectivas pérdidas económicas que éstas sufren en el proceso. Así mismo, saber qué épocas presentarán bajos niveles del río podría ser de utilidad al sector de navegación fluvial, considerando que, “Paraguay mueve grandes volúmenes de carga al año, opera la tercera mayor flota fluvial de barcas y su economía depende de la hidrovía por donde se importan y exportan alrededor del 90% de los productos comercializados en el país”, según Paraguay fluvial (nov.2018)

Con el objetivo de contribuir a la mejora de los resultados de los actuales métodos de previsión, en este trabajo se analizaron modelos estocásticos de correlación y regresión (regresión lineal y ARIMA) para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción.

Este trabajo forma parte de la tesis de grado en Ingeniería Ambiental con mismo título, presentado por Orihuela (2018), la misma, se añade in extenso en los anexos.

### 2.5.2. Alcance

Se consideró un alcance geográfico, tomándose en cuenta las riberas del río correspondientes a las ciudades de Asunción, Concepción, Bahía Negra y Pilar para la recopilación de datos de niveles y precipitación, y para el control de calidad de datos de niveles. Las previsiones se realizaron para Asunción. Se tomaron esas 4 estaciones por la extensión de su registro histórico de datos. Son las 4 estaciones que aparecen en los pronósticos de la DMH-DINAC e indicadas en la figura 40.

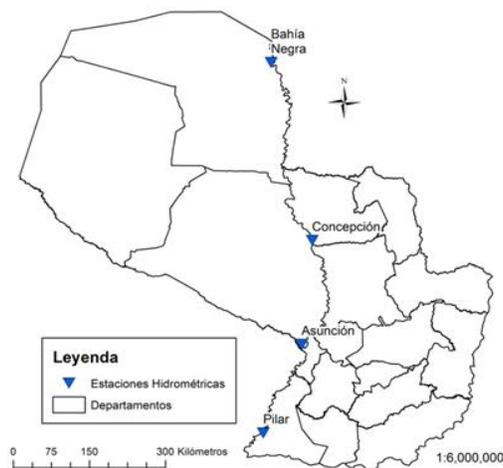


Figura 40. Estaciones hidrométricas del alcance geográfico. Base de datos del río Paraguay

Las fuentes de datos de los niveles hidrométricos fueron la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP), la Armada de la República del Paraguay (ARP), la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) y la plataforma virtual “ysry” de la DMH. La DMH obtiene los datos de niveles de las estaciones (medidos con reglas hidrométricas) a cargo de la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP).

Los datos de precipitación recopilados corresponden a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

Se tienen datos diarios por año de las estaciones que figuran en la tabla 1. Estos datos se encuentran disponibles en formato Excel, en el CTA (Centro de Tecnología Apropriada de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción).

Tabla 10. Fecha de inicio y fin de los datos recopilados.

Niveles del río Paraguay				
Fecha/Estación hidrométrica	Asunción	Concepción	Bahía Negra	Pilar
Inicio del registro de los datos	01/01/1904	01/01/1911	01/01/1932	01/01/1932
Fin del registro de los datos	09/10/2018	09/10/2018	30/08/2018	30/08/2018
Cantidad de datos	41921	39364	31654	31654
Precipitación				
Fecha/Estación	Asunción	Concepción	Bahía Negra	Pilar
Inicio de los datos	01/10/1959	11/06/1959	01/01/1956	01/01/1958
Fin de los datos	31/12/2017	31/12/2017	25/04/2017	31/12/2017.

Se tienen datos diarios por año de las estaciones que figuran en la tabla 10. Estos datos se encuentran disponibles en formato Excel, en el CTA (Centro de Tecnología Apropriada de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción).

El control de calidad se realizó para los datos de niveles de las estaciones del alcance, desde enero del año 2000 hasta agosto 2018. El periodo anterior, hasta 1999, ya se había validado, en el marco de un proyecto de la FIUNA, denominado: “Zonificación de áreas inundables del río Paraguay”, aunque también se detectó un caso llamativo en este periodo, expuesto con más detalles en el capítulo siguiente.

Este control de calidad consistió en revisar la integridad de los datos, es decir, primeramente si había días, meses o años de datos faltantes. Luego, se realizó un control de cambios en los niveles de un día al siguiente, tanto para ascensos como descensos de nivel; es decir, se realizó la diferencia de niveles entre el día actual y el anterior, y si esa diferencia absoluta superaba los 20 cm se controlaba gráficamente, para lo cual se realizaron gráficos de niveles y precipitación (en simultáneo) vs fecha para ver si se trataba de un error, o si se era consecuencia de una precipitación puntual.

Respecto a las fechas con datos faltantes, indicadas en la tabla 11, si correspondían, desde 1 día a 1 semana de datos faltante, fueron completados utilizando el promedio del día posterior y anterior. Meses o años completos faltantes no se completaron.

**Tabla 11.** Fechas con faltantes de datos de niveles del río Paraguay.

<b>Fechas de niveles faltantes</b>				
<b>Concepción</b>			<b>Pilar</b>	
<b>enero</b>	1912		del 6/09 al 27/09	1962
<b>febrero</b>	1912			
<b>noviembre</b>	1912		octubre	1999
			noviembre	1999
<b>octubre</b>	1914			
<b>noviembre</b>	1914		del 12/03 al 7/05	2000
<b>diciembre</b>	1914		del 1/08 al 19/09	2000
			del 6/10 al 23/10	2000
<b>completo</b>	1916		del 27/11 al 31/12	2000
<b>completo</b>	1999			
			del 1/01 al 2/03	2001
<b>diciembre</b>	2002		del 22/11 al 4/12	2010
<b>enero</b>	2003		diciembre	2011
			enero	2012
			febrero	2012

Se compararon datos de distintas fuentes. Se analizaron las diferencias entre fuentes de datos que se encontraron a la hora del análisis de calidad. Al pasarse entre entidades, los datos se alteraron, y diferentes entidades presentaban diferentes datos.

Las fechas filtradas son las que presentaban una diferencia, en valor absoluto, mayor a los 5 cm. Los resaltados son los seleccionados para la base de datos, y por lo tanto, para las previsiones. La fuente de datos 1 corresponde a la plataforma “ysry” y la fuente de datos 2 es la ANNP.

En la figura 41 se observa un ejemplo de errores encontrados en las series de datos, al comparar de diferentes fuentes.

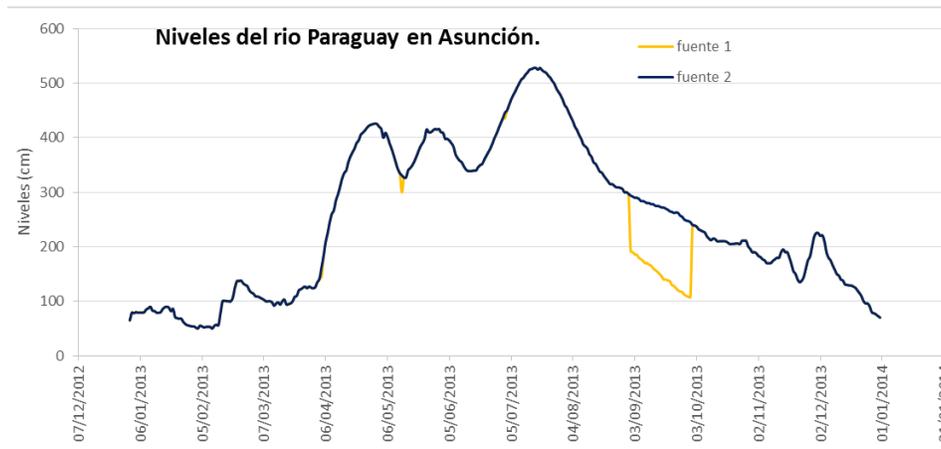


Figura 41. Ejemplo de error encontrado en la serie de Asunción.

Para Concepción, se encontró 44 fechas con diferencias mayores a 5 cm entre fuentes de datos, de las cuales 19 son mayores o iguales a 10cm, en valor absoluto.

Para Bahía Negra, se encontró 56 diferencias mayores a 5 cm entre fuentes de datos, de las cuales 30 son mayores o iguales a 10 cm, en valor absoluto.

Para Pilar, se encontró 149 fechas con diferencias mayores a 5 cm entre fuentes de datos, de las cuales 109 son mayores o iguales a 10 cm, en valor absoluto.

Y para Asunción, se encontró 57 diferencias mayores a 10 cm.

### 2.5.3. Análisis estadístico de la serie temporal de niveles de Asunción

La serie a ser analizada es la de niveles hidrométricos del rio Paraguay en Asunción. Esta serie univariante fue entrada de los modelos presentados, excepto el caso en que se correlacionó los niveles de Asunción con los de una estación aguas arriba, Concepción. El registro de datos utilizado se observa en la figura 42.

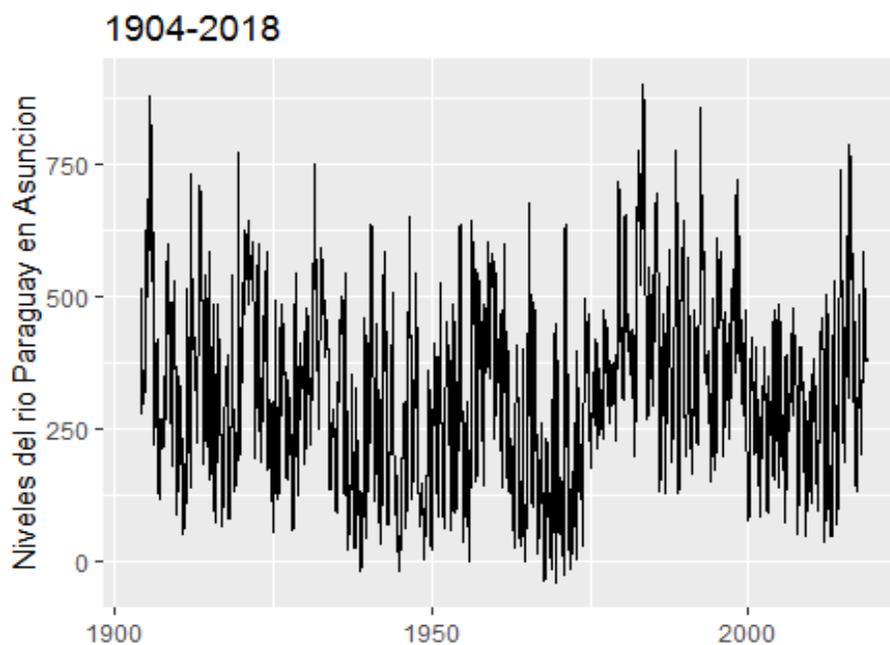
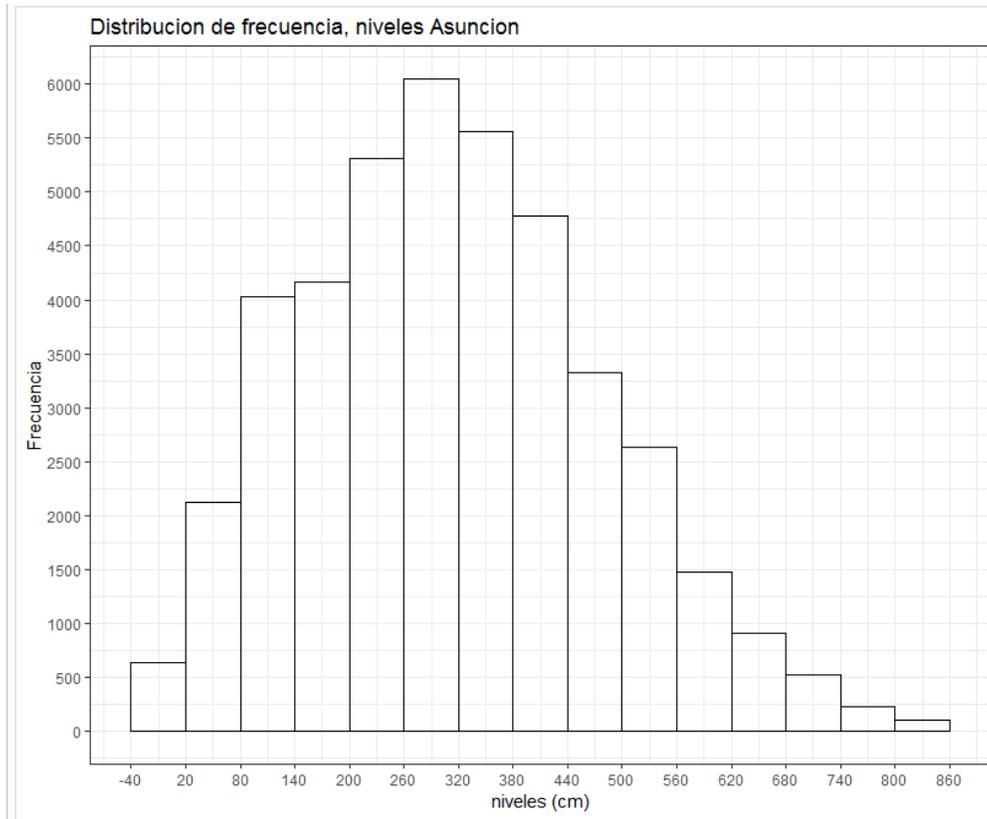


Figura 42. Serie histórica de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción 1904-2018

A continuación se presenta la distribución de frecuencia de niveles del río Paraguay en Asunción (tabla 12 y figura 43). Se observa que gráficamente se aproxima a una distribución normal.

Tabla 12. Distribución de frecuencias de niveles del río Paraguay en Asunción.

n° intervalos de clase	niveles	Freq
1	(-40,9,22.7]	663
2	(22.7,85.5]	2336
3	(85.5,148]	4362
4	(148,211]	4429
5	(211,274]	5670
6	(274,336]	6400
7	(336,399]	5441
8	(399,462]	4681
9	(462,525]	3005
10	(525,587]	2479
11	(587,650]	1228
12	(650,713]	643
13	(713,776]	382
14	(776,838]	97
15	(838,902]	115



**Figura 43.** Distribución de frecuencias de niveles del río Paraguay en Asunción.

Para la descomposición de la serie temporal se necesitó primero identificar el tipo de modelo, aditivo o multiplicativo.

Si la desviación estándar se incrementa a medida que se incrementa la media, entonces se tiene un modelo multiplicativo, caso contrario se tiene uno aditivo.

Se observó la media y la desviación estándar en diferentes momentos de la serie. Se puede ver en la tabla 13 que no se cumple que la desviación típica se incremente siempre que la media se incremente. Por lo tanto se tomó un modelo aditivo para la descomposición.

**Tabla 13.** Media y desviación típica para diferentes épocas, de niveles en Asunción.

fecha	media	desv. estándar	fecha	media	desv. estándar
01/10/2009	155.03	17.63	01/10/2017	241.55	16.85
01/11/2009	169.23	21.34	01/11/2017	253.87	6.64
01/12/2009	180.06	45.25	01/12/2017	324.39	28.47
01/01/2010	286.58	44.16	01/01/2018	512.94	69.57
01/02/2010	299.07	34.25	01/02/2018	536.54	31.92
01/03/2010	364.06	10.75	01/03/2018	541.52	16.96

Primero se tiene la serie sin descomponer, luego la tendencia, la estacionalidad y el componente aleatorio. La serie no tiene una tendencia únicamente creciente o decreciente.

Se observa en la figura 44 que los patrones se repiten anualmente. El movimiento de la serie se completa dentro de la duración de un año y se repite a sí mismo año tras año, con una estacionalidad de 6 meses: generalmente se tiene una forma campana para la serie de niveles, 6 meses tiende a subir hasta alcanzar su pico en junio, julio y luego tiende a bajar. Pero esto ha ido cambiando a los largo de estos últimos años.

Respecto a la componente cíclica, se identificaron periodos de “aguas bajas”, como el periodo desde el año 1962 al año 1973, que se repitió similarmente desde 2000 a 2014, y periodos de “aguas altas”, ejemplo de año 1979 al año 1998 que podría estar repitiéndose desde el 2015.

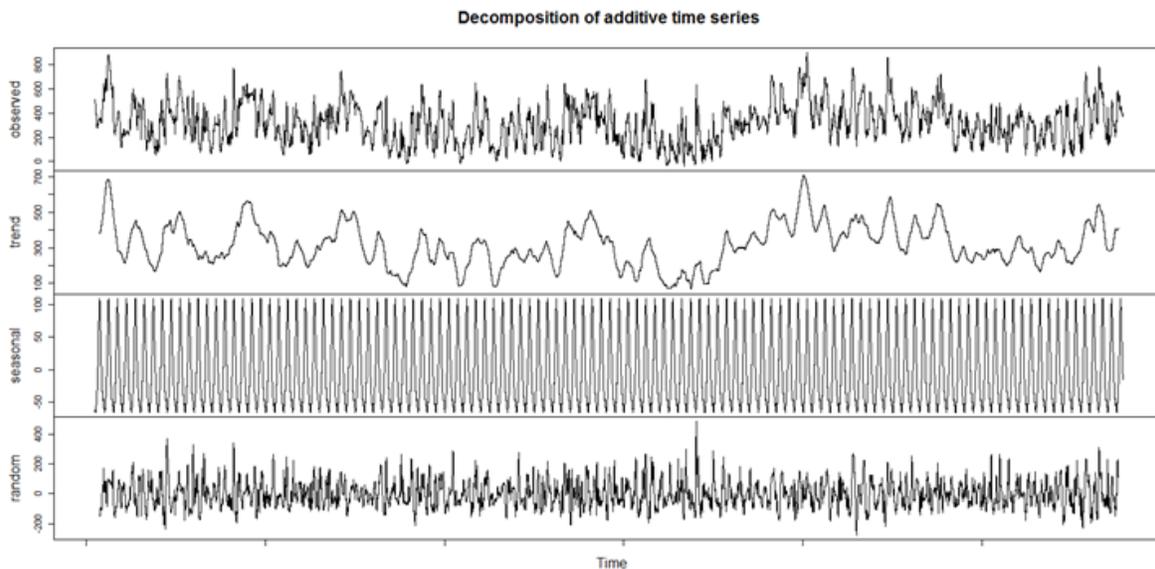


Figura 44. Descomposición de la serie histórica de niveles de Asunción. (1904-2018).

### 2.5.3.1. Análisis de media de la serie

La media del periodo de enero del año 1904 a octubre del año 2018 es 315,86 cm. En la tabla 14 se muestran los resultados para los diferentes periodos discretizados.

Analizando las medias se identificó un periodo de aguas bajas desde el año 1962 hasta el año 1973, con una media de 164,8 cm; y un periodo de aguas altas del año 1979 al año 1998, con una media de 435,5 cm. Estos periodos se identifican en la tabla 14.

Para Ladario (puerto del río Paraguay en Brasil), Clarke (2003) identifica el periodo de 1960-70 con una fuerte tendencia negativa, lo que podemos relacionarlo con el periodo recién identificado de 1962-1973 como aguas bajas para el río Paraguay en Asunción; e identifica que de 1970 al 80 Ladario presenta una fuerte tendencia positiva, lo que podemos relacionarlo con el periodo identificado de 1979-98 como aguas altas para Asunción.

En la figura 14, se muestran las medias para diferentes periodos en contraste con la media aritmética de niveles en la estación de Asunción. Como se ve la media no es la misma todos los años, y tiene muchas fluctuaciones a lo largo de la serie 1904-2018. La media no es estable en el tiempo, pero sin embargo, hay periodos que fueron reconocidos como de aguas altas o bajas que tienen respectivamente medias aproximadamente iguales.

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

	desde	hasta	media
serie histórica	01-ene 1904	31-ago 2018	315.86
dividiendo en 2 la serie	01-ene 1904	31-dic 1957	263.92
	01-ene 1958	31-ago 2018	237.18
periodos de 25 años	01-ene 1904	31-dic 1929	340.8
	01-ene 1929	31-dic 1954	272.26
	01-ene 1954	31-dic 1979	267.82
	01-ene 1979	31-dic 2004	396.92
	01-ene		
periodos de 10 años	01-ene 1904	31-dic 1914	375.86
	01-ene 1914	31-dic 1924	337.41
	01-ene 1924	31-dic 1934	314.96
	01-ene 1934	31-dic 1944	232.27
	01-ene 1944	31-dic 1954	235.49
	01-ene 1954	31-dic 1964	297.88
	01-ene 1964	31-dic 1974	182.69
	01-ene 1974	31-dic 1984	419.91
	01-ene 1984	31-dic 1994	398.91
	01-ene 1994	31-dic 2004	331.82
periodos varios.	01-ene 2004	31-dic 2014	280.09
	01-ene 1990	31-dic 2001	369.16
	01-ene 2001	31-dic 2011	266.55
periodos varios.	01-ene 2010	31-dic 2018	344.43
	01-ene 1938	31-dic 1955	237.18
	01-ene 1962	31-dic 1973	164.82
	01-ene 1979	31-dic 1998	435.55
	01-ene 1999	31-dic 2013	263.92
	01-ene 2014	31-ago 2018	409.42

Tabla 14. Clasificación en aguas altas y bajas del periodo 1974-91.

<b>1974</b>	<b>1975</b>	<b>1976</b>	<b>1977</b>	<b>1978</b>	<b>1979</b>	<b>1980</b>	<b>1981</b>	<b>1982</b>
medias	bajas	bajas	bajas	bajas	altas	altas	medias	altas
<b>1983</b>	<b>1984</b>	<b>1985</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>
altas	medias	altas	bajas	equilibrado	equilibrado	altas	equilibrado	bajas

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

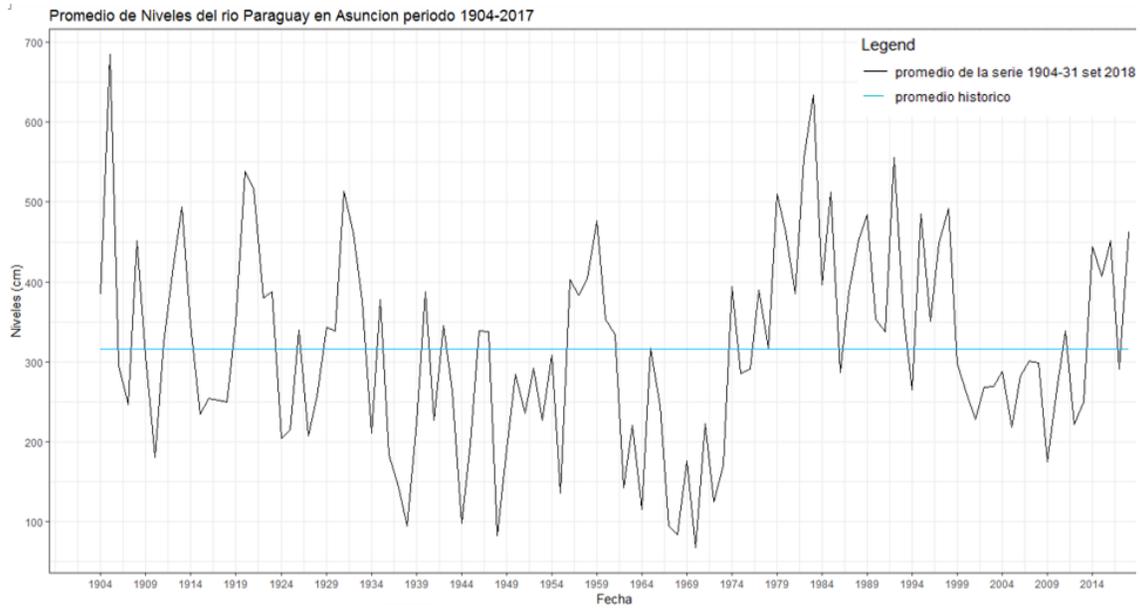


Figura 45. Medias anuales de niveles del rio Paraguay en Asunción.

2.5.3.2. *Análisis de varianza*

Como se observa en la figura x, resulta obvio que la amplitud de la varianza varía con el tiempo. Ni la media ni la varianza son constantes en toda la serie histórica.

De acuerdo a la figura 46, se detecta una anomalía hacia el año 1971, y analizando dicho año, se ve que hay un comportamiento muy llamativo, un aumento de más de 6 m en un mes (figura 46).

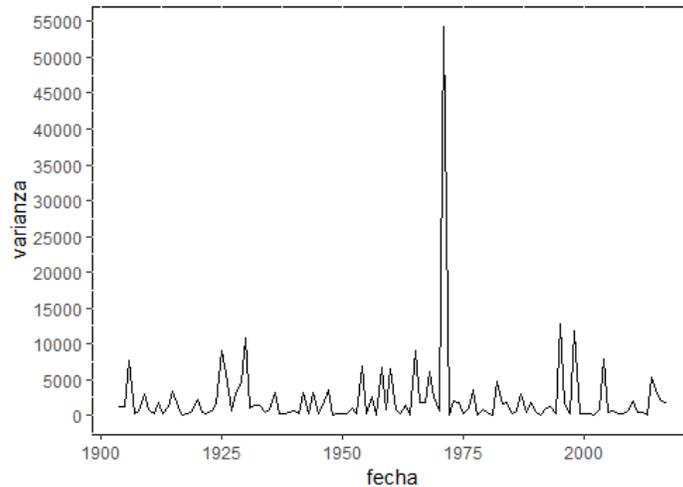


Figura 46. Análisis de varianza serie histórica de niveles (1904 a agosto-2018) en Asunción

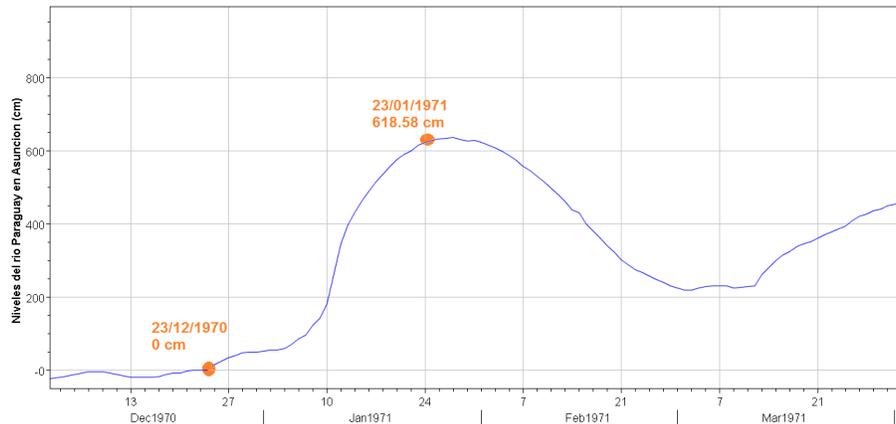


Figura 47. Anomalía detectada en enero de 1971.

El nivel del río Paraguay en Asunción se registra como 0 cm el 24/12/1970, y como 622 cm el 24/01/1971, habiendo así una diferencia de 6, 22 m en 1 mes.

El nivel del río Paraguay registrado en Concepción el 12/12/1970 es de 68 cm, y el 14/01/1971, 554 cm, indicando así una diferencia de 4,86 m en 32 días.

En Pilar, el nivel registrado del río Paraguay el 6/12/1970 es de 1 cm, y el 6/02/1971, 631 cm, habiendo así una diferencia de 6, 30 m en 62 días. Asunción y Pilar presentaron así una diferencia de más de 6 m en 1 y 2 meses respectivamente. Concepción presentó una diferencia de 4,86 m en aproximadamente un mes. Se caracteriza lo sucedido en Asunción de diciembre-1970 a enero 1971 es anormal.

De un total de 1377 meses, desde enero 1904 a setiembre 2018, 1307 meses presentan una sumatoria mensual de las variaciones diarias menores a 2m, 56 meses entre 2 m y 3 m, 12 meses con variaciones mayores a o iguales a 3 m, 1 mes presenta una variación mayor a 4,5 m, y a su vez, un mes registra variaciones mayores a 5,5 m, el cual corresponde a enero de 1971, ya mencionado. Estas variaciones se observan en la figura 48 para todo el periodo.

Los resultados del análisis, se detallan en la tabla 15

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

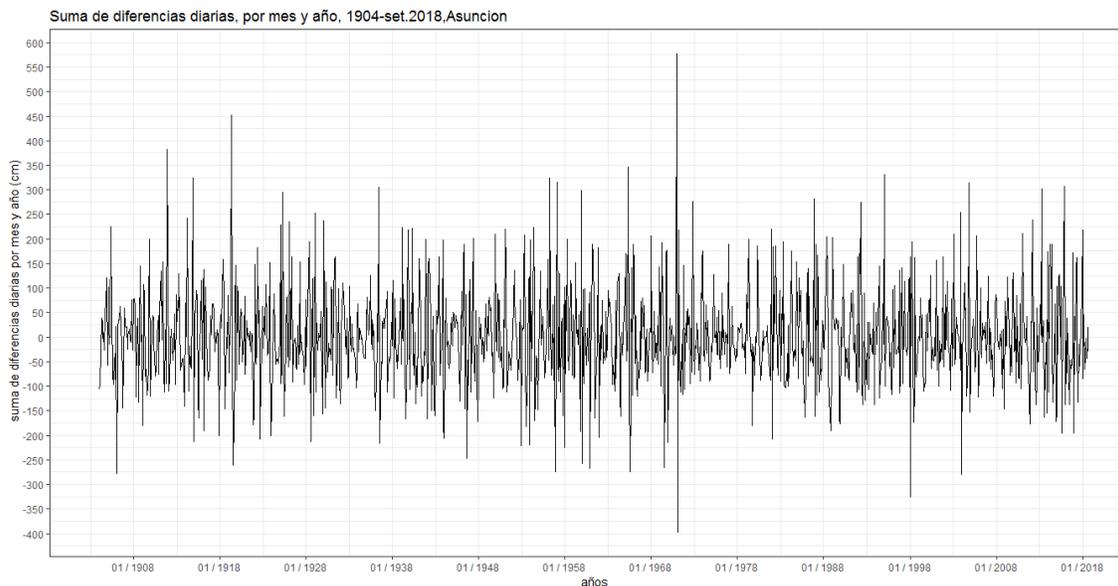


Figura 48. Suma de diferencias diarias de niveles rio Paraguay en Asunción. Periodo 1904-2018.

Tabla 15. Análisis de desviación estándar y covarianza para diferentes periodos.

periodo	cantidad de años	desviacion estandar	desviacion estandar	covarianza Concepcion-Asuncion
1936-1955	19	139.28	167.07	15783.27
1956-1959	3	107.49	128.46	11776.61
1962-1973	11	91.45	133.70	11186.61
1979-98	19	150.40	153.05	21323.02
1999-2013	14	97.61	105.53	9488.46
2014-2018	4	127.38	159.17	18698.37
1980-1990	10	157.77	159.38	23777.08
1991-2001	10	134.59	147.54	18176.13
2002-2012	10	98.00	104.34	9180.70
2013-2018	5	132.49	166.98	1904.00

1911-2018 (eliminando fechas faltantes)	$\bar{\chi}$ Concepcion	$\bar{\chi}$ Asuncion	covarianza de la serie completa. 1911-2018
			22697.45

2.5.3.3. Autocorrelación simple y parcial de la serie de tiempo de niveles hidrométricos de Asunción

En la ACF las correlaciones grandes no desaparecen, lo que indica que la diferenciación pudiera requerirse para proveer una media constante. La serie de niveles hidrométricos del rio Paraguay en Asunción no es estacionaria, entonces se procedió a diferenciar la serie una vez, para ver si con ello se eliminaba la no estacionariedad debido a la media.

Los coeficientes de autocorrelación del correlograma de la serie 1 vez diferenciada decrecen exponencialmente (figura 49), por lo tanto se consideró la serie como estacionaria.

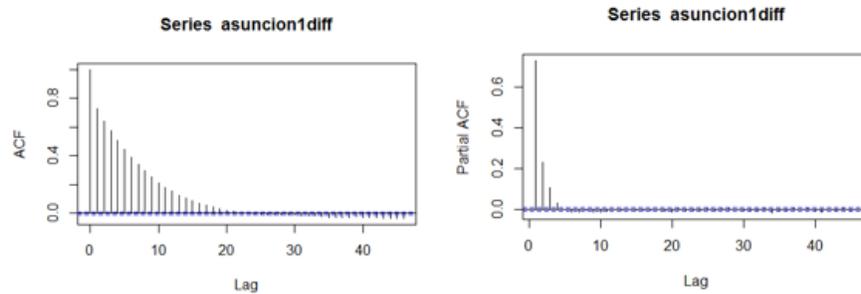


Figura 49. Serie de Asunción 1 vez diferenciada. ACF (izquierda) y PACF (derecha).

### 3. Resultados

#### 3.1. Modelo hidrodinámico del río Paraguay y modelación hidrológica de cuencas de aporte

##### 3.1.1. Resultados de la modelación hidrológica

###### 3.1.1.1. Introducción

Se analizaron las cinco cuencas detalladas en el capítulo previo y se modelaron en el HEC-HMS cada una por separado, el objetivo principal de la modelación fue el de generar caudales de aporte al río Paraguay que fueron utilizadas en la simulación y calibración del modelo hidráulico.

Se generaron caudales sintéticos que se utilizaron para la calibración de las cuencas en las que no cuentan con caudales observados de estaciones de monitoreo. A continuación, se presentan los resultados alcanzados de acuerdo al esquema detallado en el informe anterior.

###### 3.1.1.2. Modelo Conceptual del Sistema en HEC-HMS

Teniendo definidas las cuencas de estudio, se procedió a generar el modelo de cuencas para cada una de ellas, primeramente, por las características propias de un Modelo Hidrológico Semi distribuido, es imprescindible subdividir el área de proyecto en unidades más pequeñas llamadas subcuencas, generadas de acuerdo a la red de drenaje y la topografía y a las cuales se le asignarán características particulares de acuerdo al tipo de suelo, uso de suelo, precipitación media, etc. Este proceso se realiza para cada una de las cuencas aportantes.

Una vez definido el sistema de drenaje de las cuencas de estudio, es posible crear el modelo conceptual en el HEC-HMS.

En el modelo conceptual se indican los elementos por los cuales estará compuesto el sistema:

-Subcuenca: representa a cada unidad de subcuenca en donde uno ingresa los parámetros asociados al modelo de pérdidas, transformación y caudal base.

-Junction: representa a los nodos del sistema real y son utilizados para sumar los hidrogramas generados en dos subcuencas.

-Reach: representa el tramo de un cauce en donde se introducirán los parámetros asociados al modelo de tránsito de hidrogramas. Este elemento une dos nodos consecutivos.

Este proceso se realizó para cada una de las cuencas aportantes, cuyos resultados se detallan a continuación.

### 3.1.1.2.1. Cuenca del río Apa

La cuenca fue subdividida en cinco unidades con áreas que rondan entre 700 a 4.500 km<sup>2</sup> (figura 50). De acuerdo a esto, fue generado el modelo conceptual, estableciendo como salida u outlet a la desembocadura en el río Paraguay (Figura 51).

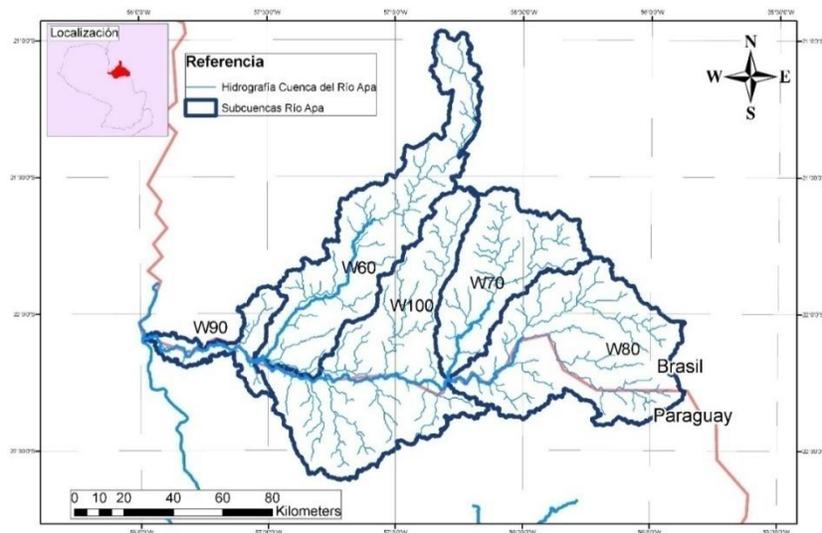


Figura 50. Subcuencas del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

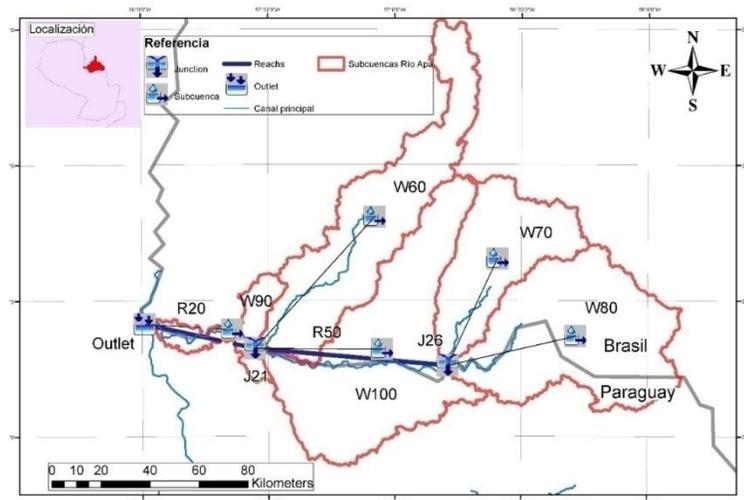


Figura 51. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Apa. Elaboración propia.

### 3.1.1.2.2. Cuenca del río Aquidabán

La subdivisión alcanzada en la cuenca y el modelo conceptual aplicado se muestran en las figuras 52 y 53. Se utilizaron cinco subcuencas, con áreas comprendidas entre 400 y 3.800 km<sup>2</sup>.

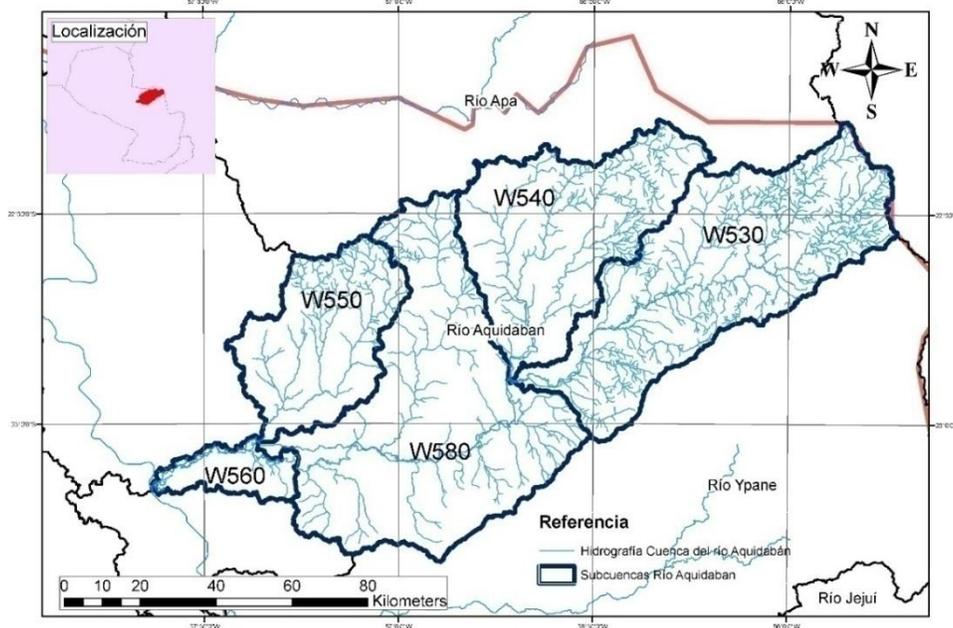


Figura 52. Subcuencas del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

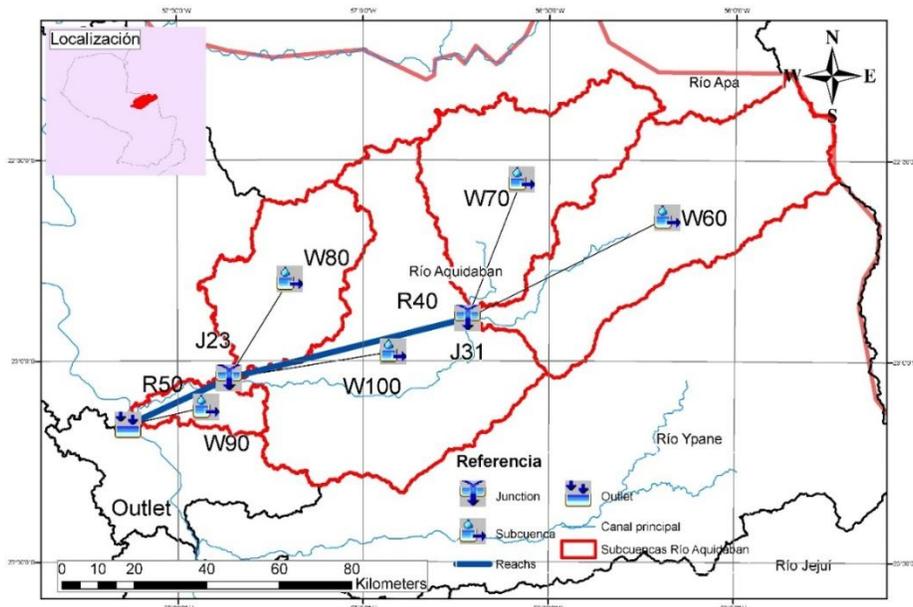


Figura 53. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.2.3. Cuenca del río Ypané

Los resultados se muestran en las figuras 54 y 55, se generaron tres subcuencas de 2.600 a 4.037 km<sup>2</sup> utilizados en el modelo conceptual.

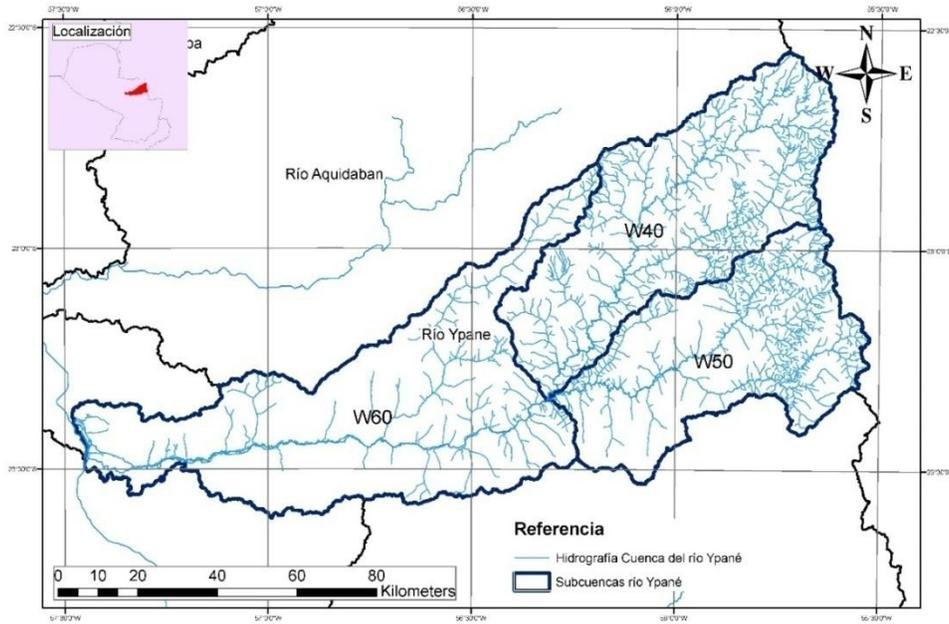


Figura 54. Subcuencas del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

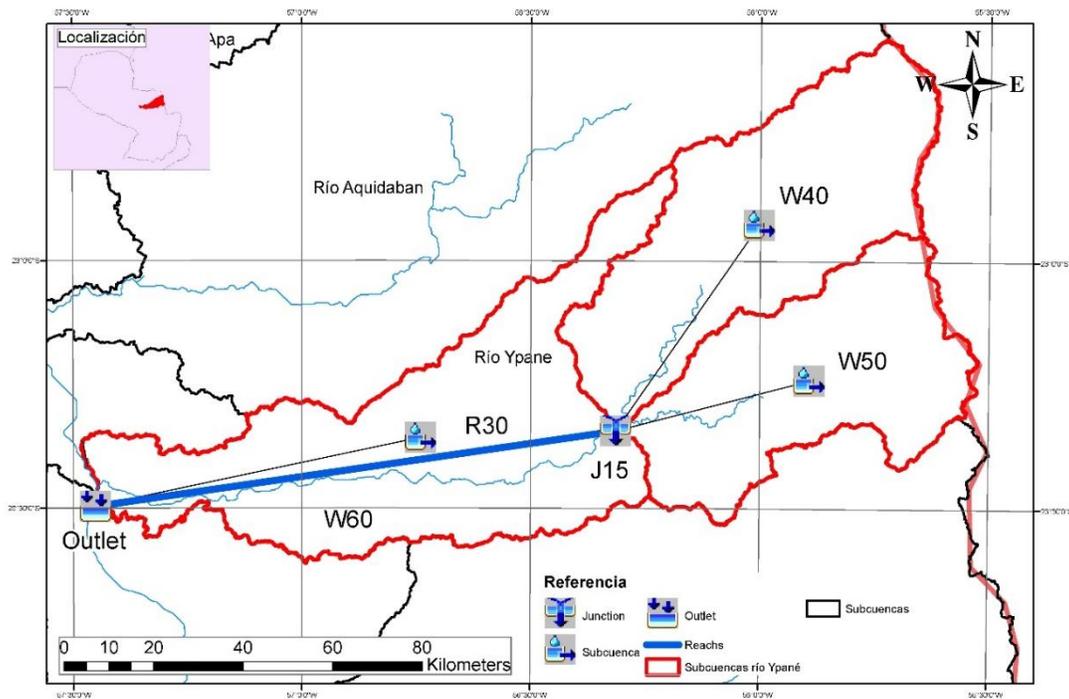


Figura 55. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.2.4. Cuenca del río Jejuí

Considerando el mayor tamaño de la cuenca, se subdividió la misma en siete unidades (figura 56), las áreas varían entre 446 a 6.300 km<sup>2</sup>, éstas se utilizaron para el modelo de cuencas (figura 57) y se estimaron los parámetros hidrológicos que las rigen en cada una.

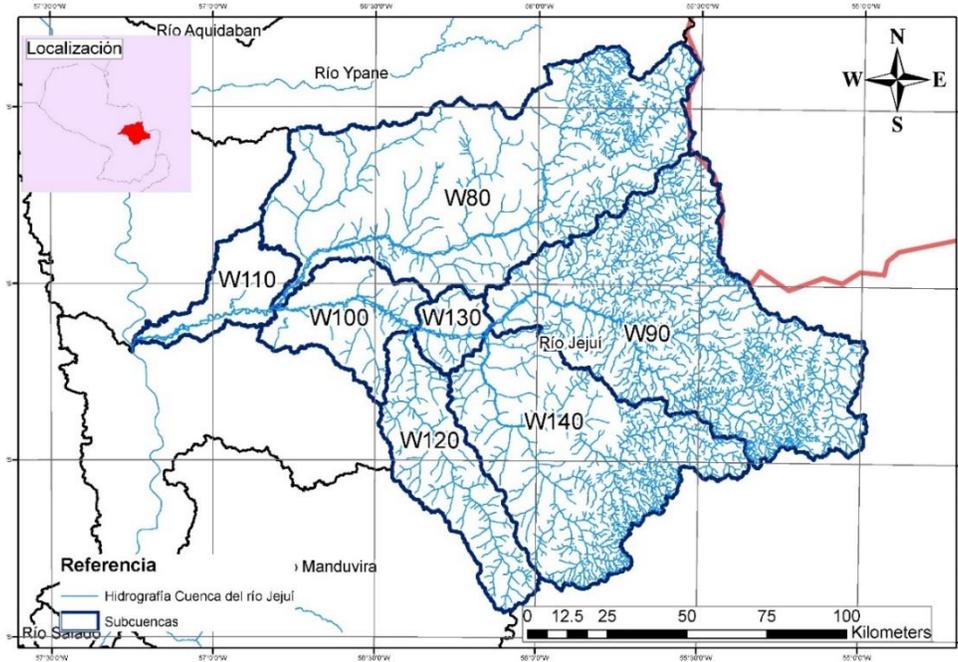


Figura 56. Subcuencas del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

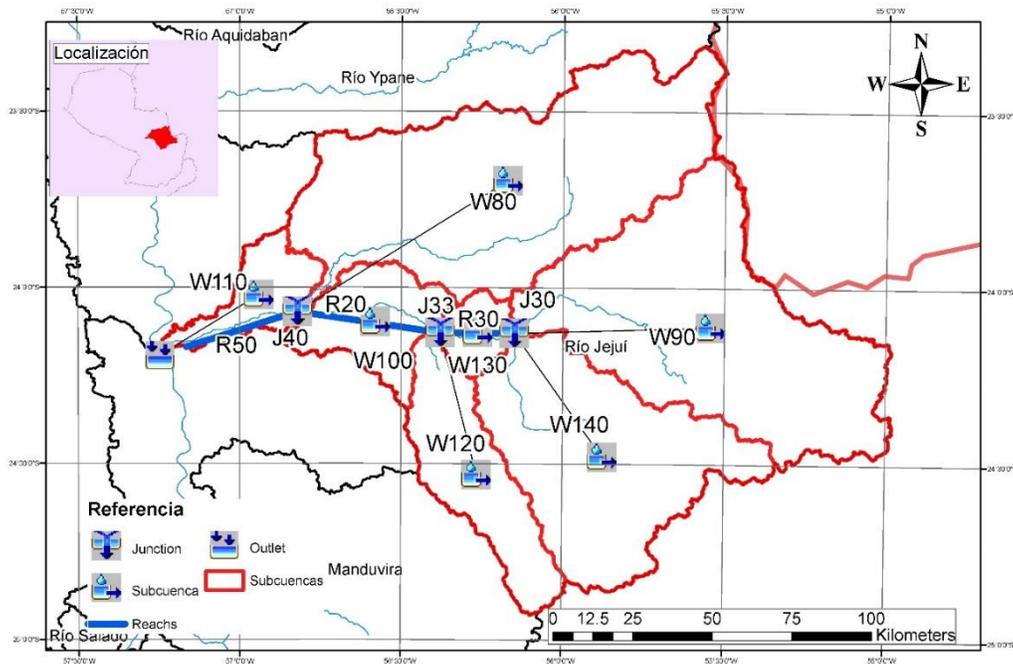


Figura 57. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.2.5. Cuenca del río Manduvirá

Para la cuenca del río Manduvirá, se generaron cinco subcuencas, con áreas que rondan los 425 a 3.800 km<sup>2</sup>. La subdivisión y el modelo conceptual aplicado se observan en las figuras 58 y 59.

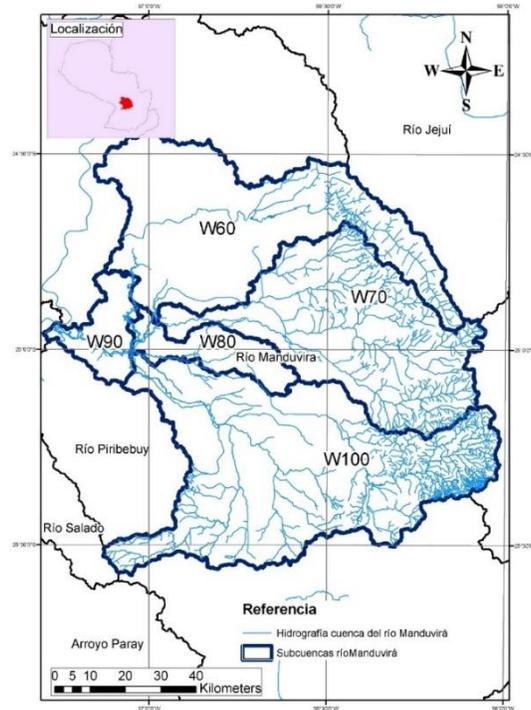


Figura 58. Subcuencas del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

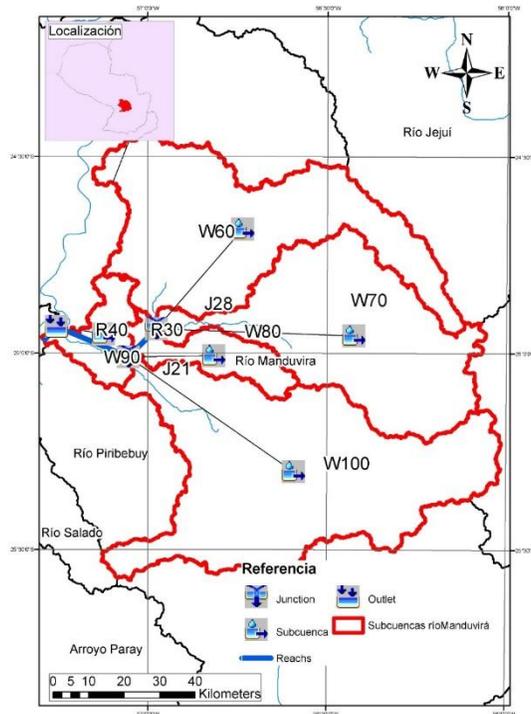


Figura 59. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.3. Proceso de Calibración

Una vez estimados los parámetros iniciales para cada cuenca, se inicia el proceso de calibración, el cual consiste esencialmente en ajustar dichos parámetros, mediante un proceso iterativo, de manera a que el caudal calculado por el modelo replique de la mejor forma posible los caudales observados.

La experiencia con los modelos hidrológicos, concentrados o distribuidos, prueba que ninguna técnica de calibración y que ningún modelo llega a una perfecta correlación entre los valores calculados y observados.

La evaluación de desempeño de cada modelo se realizó con la siguiente función objetivo:

Coefficiente Nash ( $R^2$ ): tiene un valor máximo igual a 1, que corresponde a un ajuste perfecto entre caudales simulados y observados. El valor de  $R^2$  está fuertemente influenciado por errores de caudales máximos, por esto, cuando es próximo a 1, el modelo está obteniendo un buen ajuste para los picos altos. El desempeño de un modelo es considerado adecuado y bueno si el valor de  $R^2$  supera 0,75, y es considerado aceptable si el valor de  $R^2$  queda entre 0,36 y 0,75 (Gotschalk y Motovilov, 2000).

Los periodos de calibración para las cuencas se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de datos de precipitación y caudal/nivel observados en las estaciones utilizadas, de forma a que exista una consistencia entre ellos en un mismo periodo.

Es importante recalcar que solo se cuentan con datos de caudal observado en el río Apa, con un registro extenso y con escasos datos faltantes. El proceso de calibración en las demás cuencas se

torna dificultoso debido a que, si bien se optó por el método de generación de caudales sintéticos explicado anteriormente, los datos de nivel del Anuario Hidrográfico (ANNP) no se encuentran completos, con periodos muy extensos sin datos, con esto en cuenta, se seleccionaron los periodos de forma a poder simular un periodo de al menos dos años, contando con una buena cantidad de datos de precipitación y nivel/caudal.

Además, el método de área pendiente se utilizó ante la ausencia de datos observados de caudal. Es por esto, que se aplicó un proceso de calibración y validación riguroso en la cuenca del Apa (en dónde si se tienen datos reales), y teniendo en cuenta la naturaleza empírica del método de generación de caudales, el ajuste de la simulación en las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá se basó en limitar los valores resultantes a que se ajusten lo mejor posible a los caudales sintéticos y que no repercutan de manera negativa en el modelo hidráulico una vez ingresados como aportes laterales. De haber errores marcados, estos se notarán en los resultados de la modelación hidráulica, permitiendo un reajuste de los parámetros hidrológicos.

A continuación, se detallan los resultados de la calibración para las cuencas de estudio.

### 3.1.1.3.1. Cuenca del río Apa

La calibración del modelo en la cuenca se realizó comparando los resultados con caudales observados por la estación São Carlos de la ANA (Figura 60).

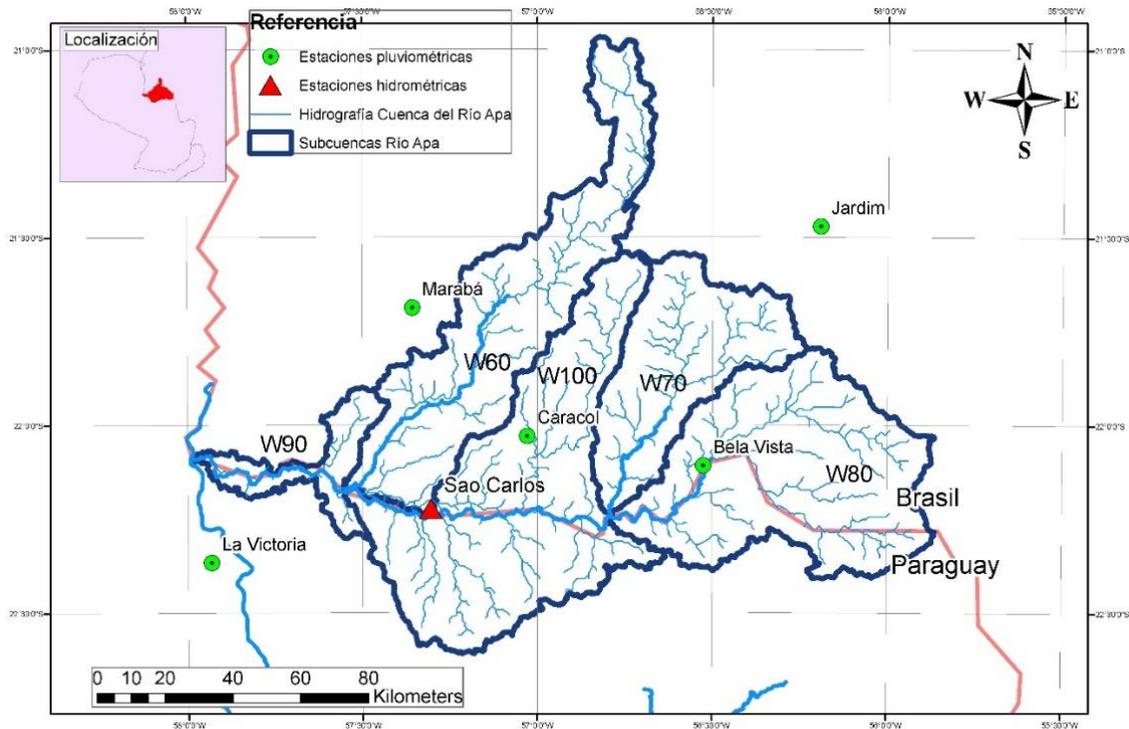
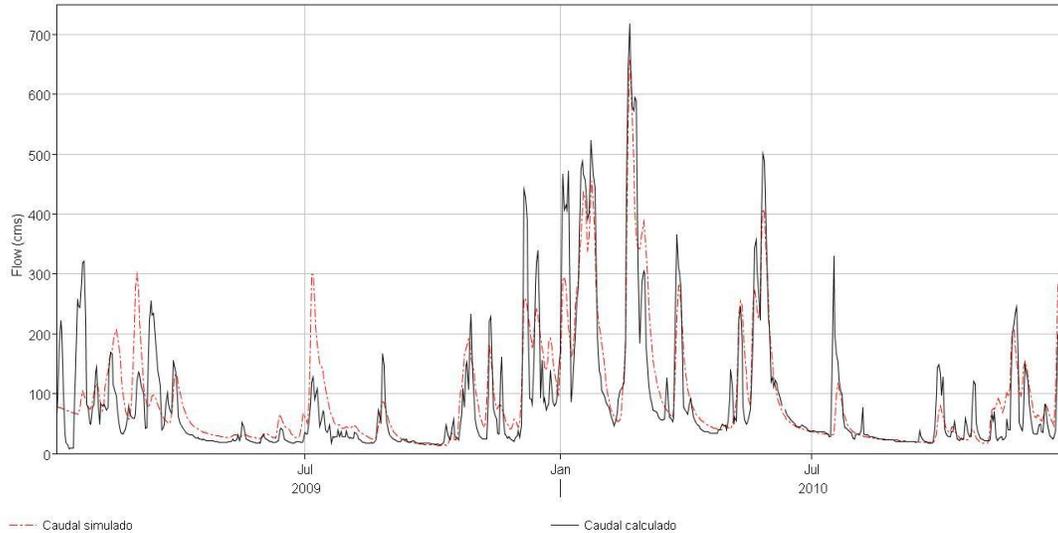


Figura 60. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

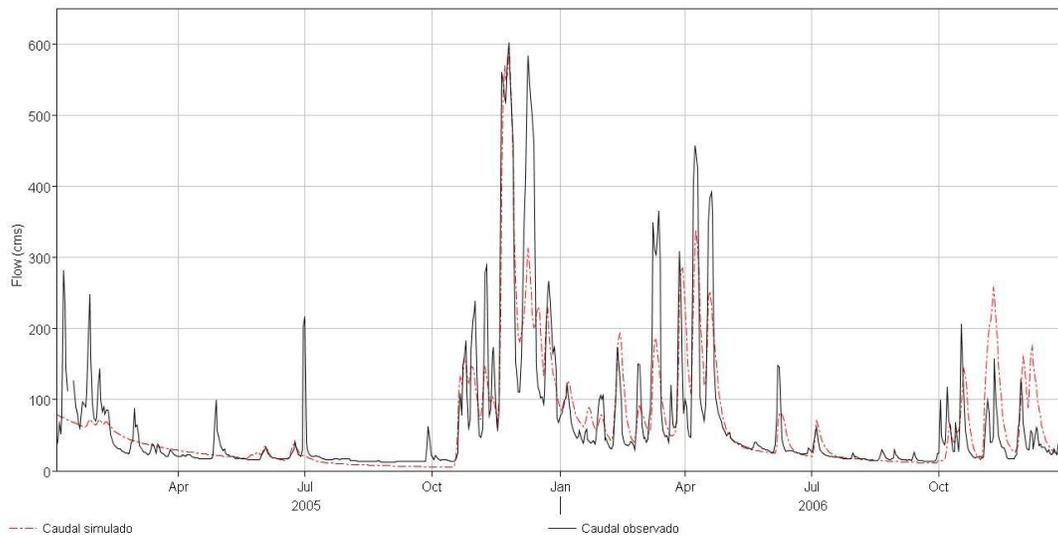
El periodo seleccionado para la calibración es del 02 de Enero del 2009 al 31 de Diciembre del 2010, a partir de los parámetros iniciales estimados, se realizó el ajuste de los mismos obteniendo

el resultado que se observa en la Figura 31. A simple vista, los caudales calculados se ajustan de buena manera a los observados, exceptuando periodos cortos al inicio de la simulación, pero representando adecuadamente los eventos de crecidas y la frecuencia del hidrograma observado.



**Figura 61.** Calibración en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros establecidos en la calibración, se validó el modelo evaluando su desempeño en un periodo diferente al de la calibración, el periodo seleccionado fue del 02 de Enero del 2005 al 31 de Diciembre del 2006, los resultados se muestran en la Figura 62. El modelo no representa correctamente la frecuencia al inicio de la simulación, sin embargo, se ajusta correctamente en periodos de crecidas y con mucha variabilidad.



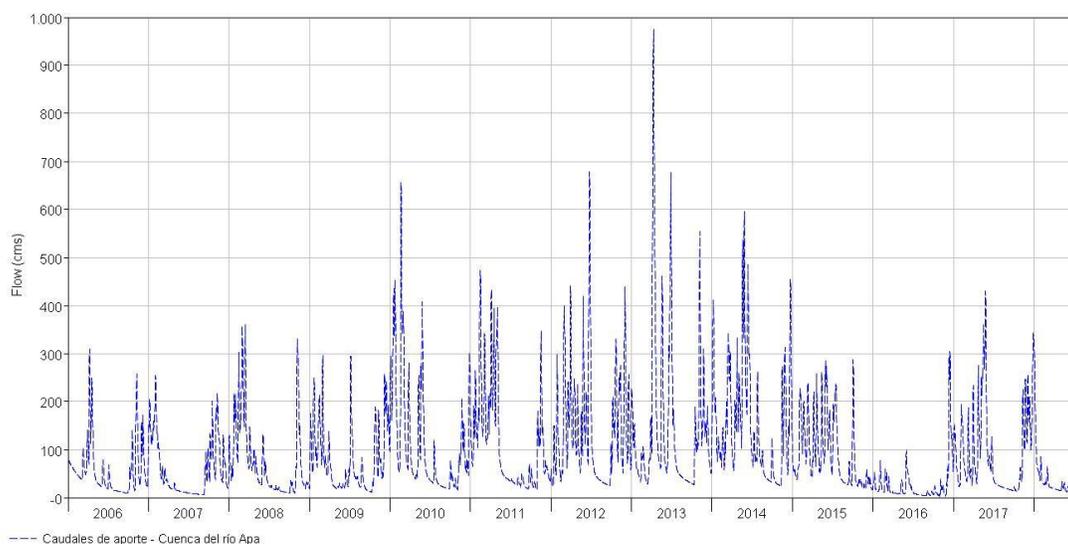
**Figura 62.** Validación en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 16 se observan los resultados resumidos de acuerdo a ciertos indicadores, considerando estos valores, se concluyó la calibración con los parámetros calibrados y validados.

**Tabla 16.** Indicadores de evaluación del modelo hidrológico en la cuenca del río Apa

Indicadores	Periodo	
	2009-2010	2005-2006
NSE	0.75	0.72
Pico máximo observado (m <sup>3</sup> /s)	716.9	602.00
Fecha pico máximo observado	20/02/2010	25/11/2005
Pico máximo simulado (m <sup>3</sup> /s)	656.9	587.8
Fecha pico máximo simulado	20/02/2010	25/11/2005
Volumen total observado (hm <sup>3</sup> )	5622.79	5622.79
Volumen total simulado (hm <sup>3</sup> )	5978.78	6939.32
Diferencia del volumen	+6.33%	+3.13%

De esta forma, con los parámetros establecidos, se generaron caudales para el periodo del 2006 al 2018, los cuales fueron utilizados como aportes laterales en el modelo hidráulico (Figura 63).



**Figura 63.** Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Apa

### 3.1.1.3.2. Cuenca del río Aquidabán

La calibración en esta cuenca consistió en ajustar los parámetros iniciales comparando los resultados calculados con los caudales sintéticos estimados a partir de datos de nivel hidrométrico del Anuario Hidrográfico. Los caudales sintéticos se generaron a partir de datos de nivel en la estación Paso Barreto de la ANNP (Figura 64).

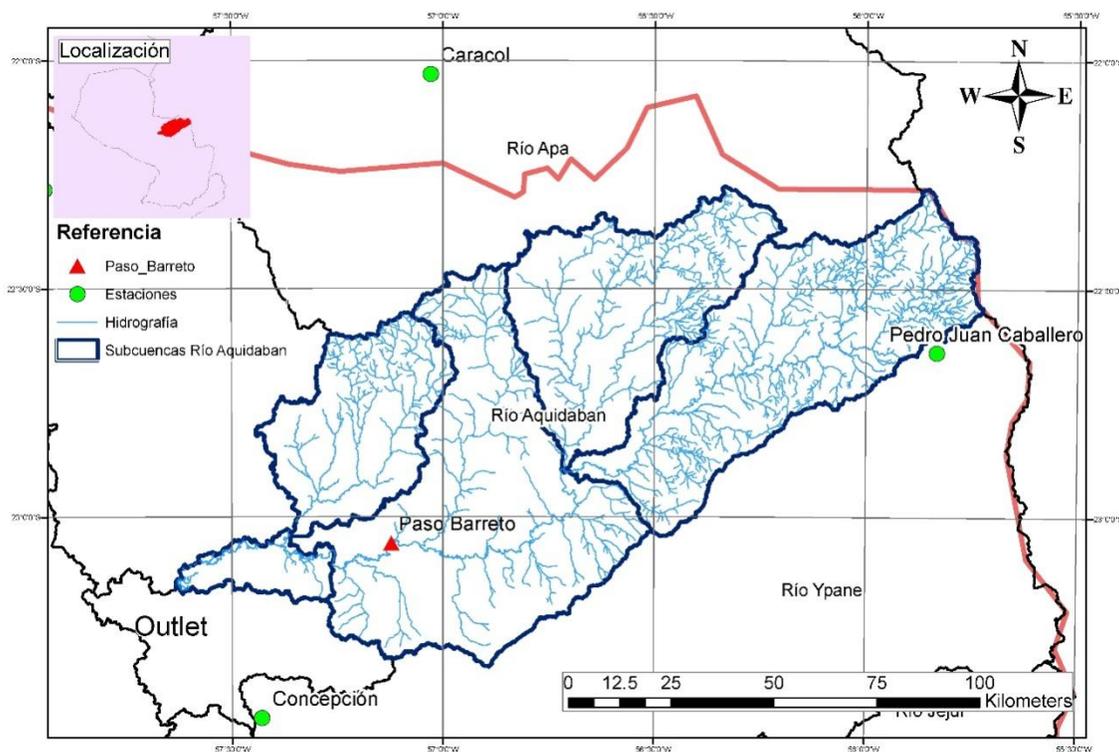


Figura 64. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

- Caudales sintéticos:

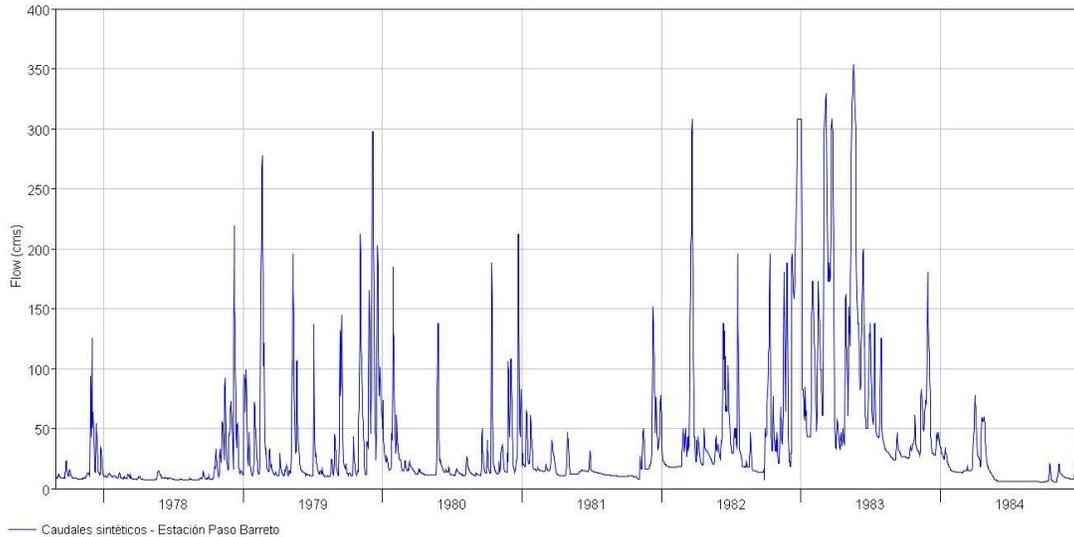
Inicialmente, se estimaron los caudales mediante el método de Área Pendiente, posteriormente, los valores medios mensuales del periodo de datos completo fueron ajustados con valores promedios mensuales de caudal del río Aquidabán, estimados por métodos estadísticos en el Proyecto “Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay (2013)”, en adelante RHPY, de la Itaipu, el resultado se muestra en la Tabla 17. Con este ajuste, se generaron caudales diarios a partir de datos de nivel (Figura 65) que se utilizaron para el ajuste del modelo hidrológico.

Tabla 17. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto

MES	Q1 RHPY	Q2 Anuario
Ene	38.08	38.72
Feb	43.68	39.62
Mar	42.72	60.00
Abr.	43.32	25.14
May.	33.68	53.74
Jun.	31.12	32.71
Jul.	38.84	26.51
Ago.	31	14.02
Sep.	39.12	16.69

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

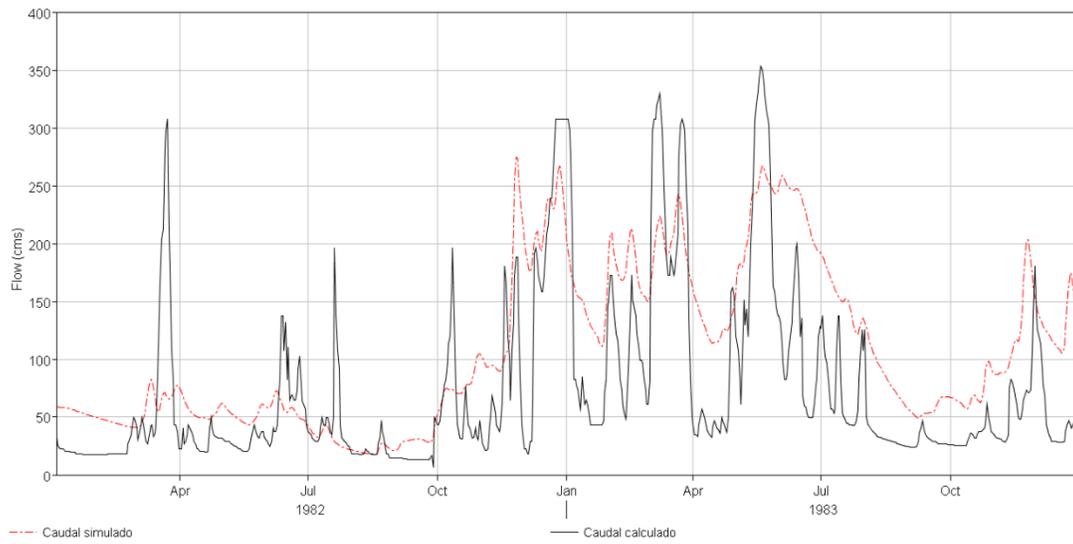
Oct.	33.8	23.23
Nov.	35.48	44.54
Dic.	39.16	75.09
<b>Promedio</b>	<b>37.50</b>	<b>37.50</b>



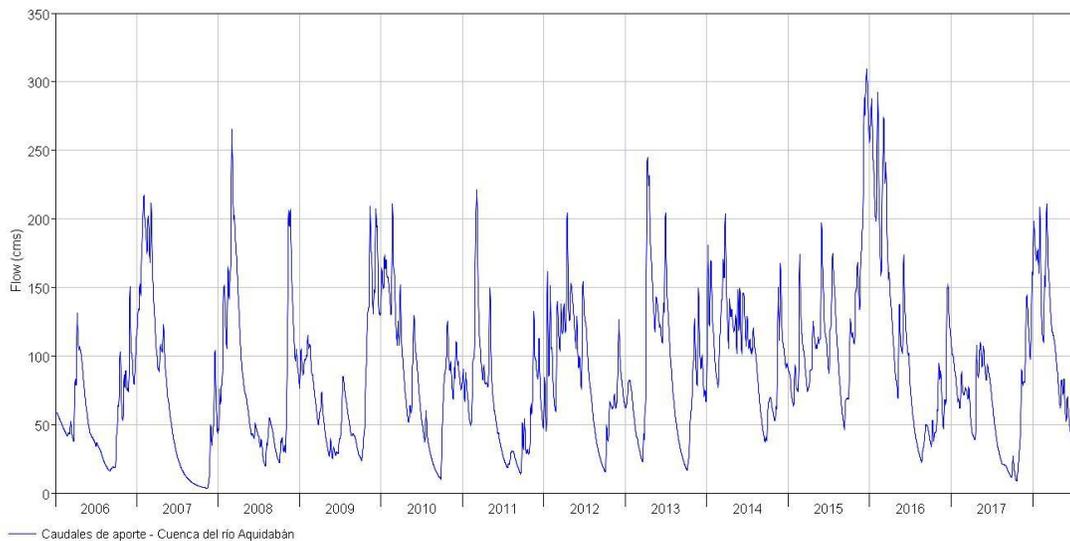
**Figura 65.** Caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto

- *Proceso de ajustes de caudales*

De acuerdo a la calidad y cantidad de los datos, se seleccionó para la calibración el periodo del 02 de Enero de 1981 al 31 de Diciembre de 1982. El resultado se muestra en la Figura 66, los caudales simulados no se ajustan principalmente en frecuencia con los caudales sintéticos, sin embargo, se mantienen dentro del mismo rango de magnitudes, considerando el método utilizado, y consultando con datos bibliográficos del río, los valores obtenidos se consideran aceptables para el propósito del modelo, así, con los parámetros establecidos, se generan los caudales de aporte por el periodo 2006 al 2018 (Figura 67).



**Figura 66.** Calibración del modelo hidrológico cuenca río Aquidabán. Elaboración propia



**Figura 67.** Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca Aquidabán.

### 3.1.1.3.3. Cuenca del río Ypané

Para la calibración y generación de caudales sintéticos, se utilizó la estación de Belén (Figura 68). Se utilizó el mismo procedimiento de ajuste que en la cuenca del río Aquidabán.

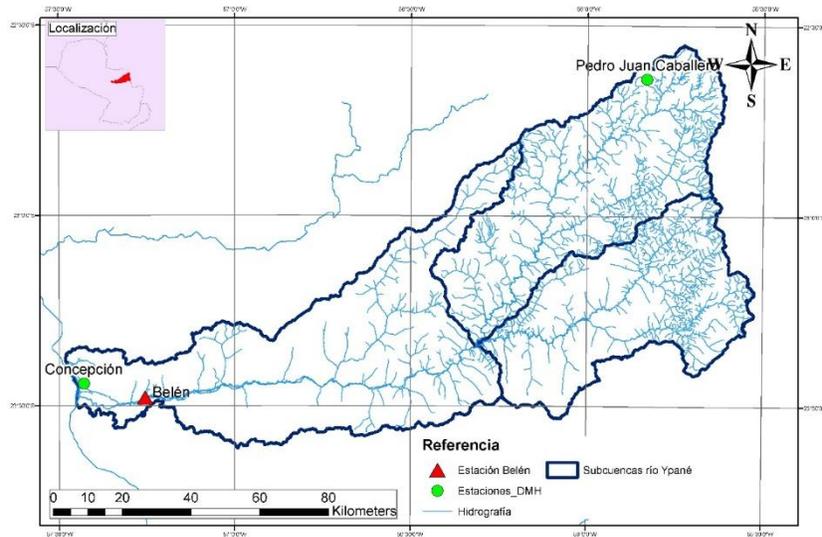


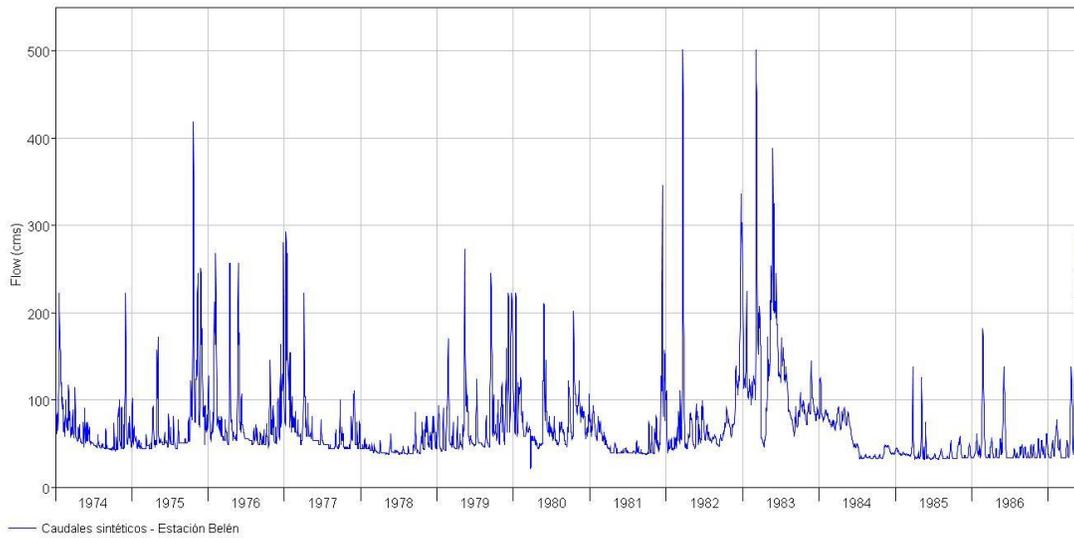
Figura 68. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

▪ *Caudales sintéticos*

Con los datos de nivel de la estación de Belén de la ANNP, se generaron los caudales sintéticos y estos se ajustaron con valores promedios mensuales estimados por el Proyecto RHPY (2013), los valores optimizados se muestran en la tabla 18. Así, se generaron caudales sintéticos utilizados para calibrar el modelo hidrológico (Figura 69).

Tabla 18. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Belén. Elaboración propia.

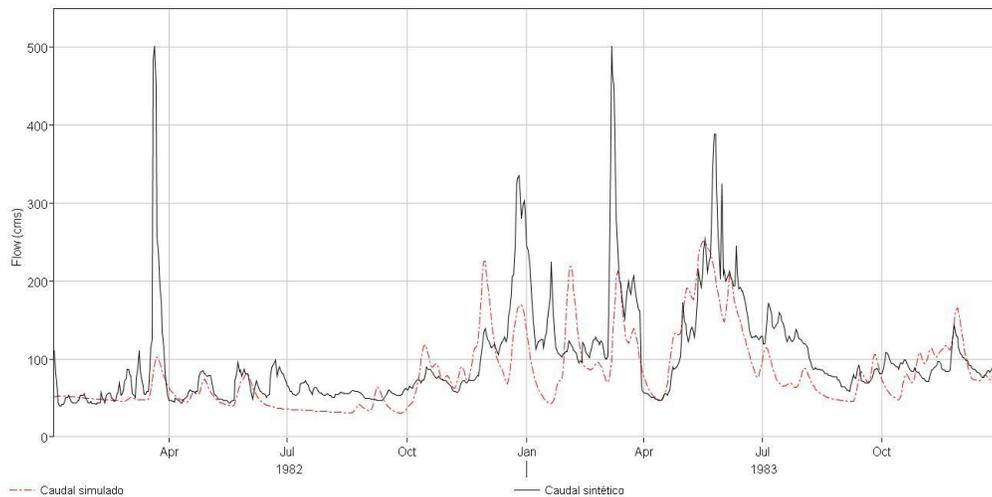
MES	Q1 RHPY	Q2 Anuario
Ene	63.37	78.63
Feb	62.43	72.31
Mar	64.91	70.26
Abr.	69.37	59.08
May.	78.31	85.69
Jun.	77.40	63.45
Jul.	69.74	53.35
Ago.	57.37	48.65
Sep.	57.20	53.42
Oct.	70.80	63.56
Nov.	73.71	71.91
Dic.	65.60	89.94
<b>Promedio</b>	<b>67.52</b>	<b>67.52</b>



**Figura 69.** Caudales sintéticos generados en la estación Belén. Fuente: Elaboración propia.

- *Proceso de ajustes de caudales*

El periodo seleccionado fue el del 02 de Enero de 1982 al 31 de Diciembre de 1983, el resultado se muestra en la Figura 70. Se muestra un mejor ajuste al de la cuenca del Aquidabán, en los caudales sintéticos, se observan picos altos que el modelo no logra replicar y que tampoco se ajustan a los valores de referencia, de igual forma, ambos hidrogramas tienen un comportamiento similar. Nuevamente, se generan los caudales de aporte al río Paraguay con los parámetros estimados (Figura 71) en el periodo del 2006 al 2018.



**Figura 70.** Calibración del modelo hidrológico cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

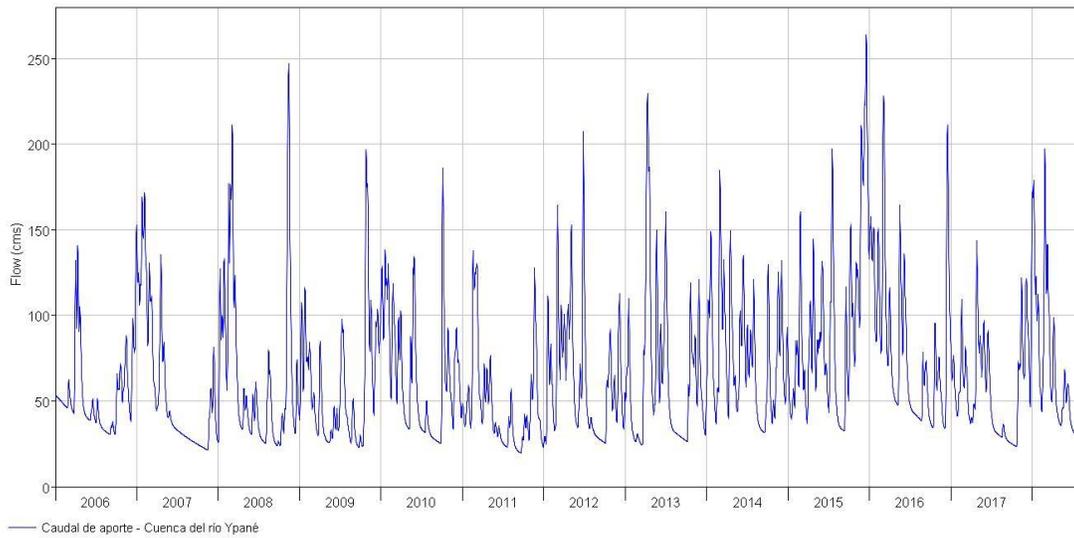


Figura 71. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca del río Ypané.

### 3.1.1.3.4. Cuenca del río Jejuí

Se utilizó la estación Cruce Ruta III de la ANNP (Figura 42) para el ajuste de parámetros.

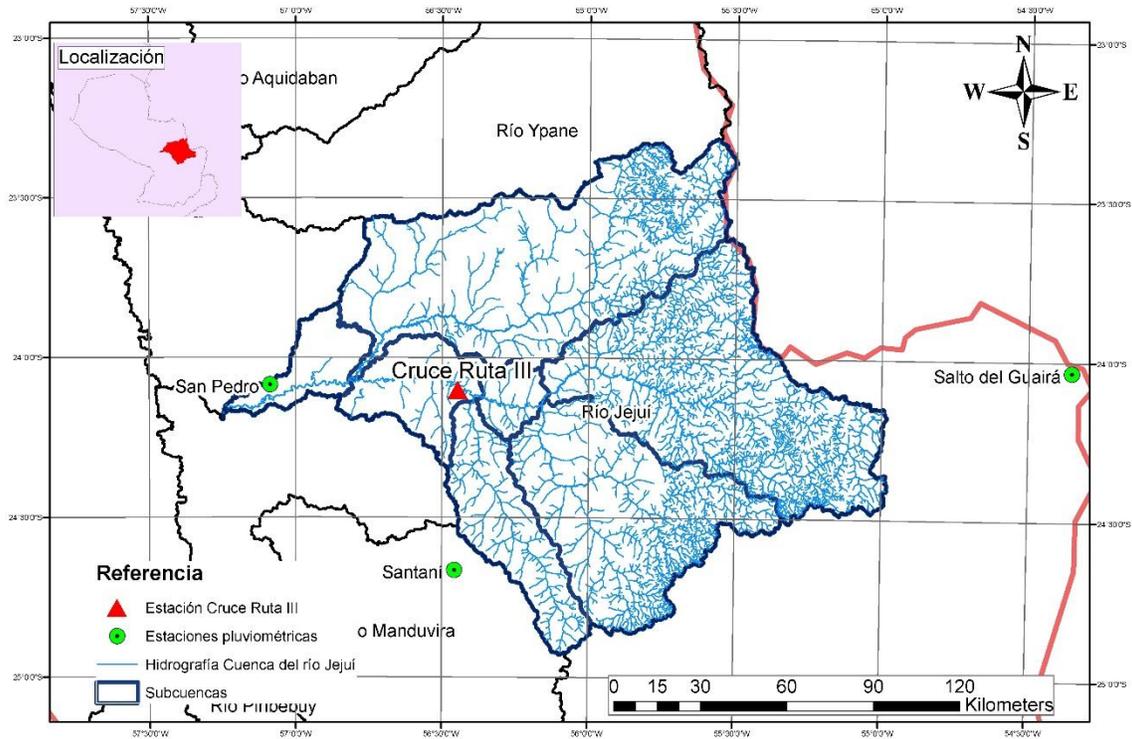


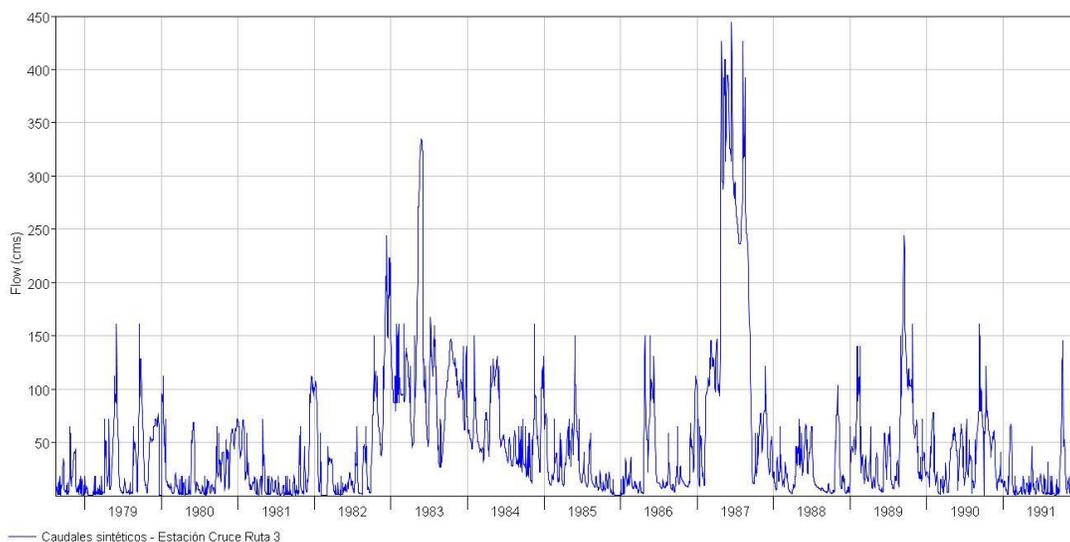
Figura 72. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

▪ *Caudales sintéticos*

Con el mismo procedimiento de las cuencas anteriores, se estimaron los caudales sintéticos a partir de los datos de nivel en la Estación Cruce Ruta III de la ANNP. Los resultados se ajustaron de acuerdo a caudales medios anuales provenientes de datos medidos de estaciones en la cuenca del río Jejuí y determinados por el proyecto RHPY (2013) (Tabla 19), los caudales generados se muestran en la Figura 43.

**Tabla 19.** Ajuste de caudales sintéticos generados en estación Cruce Ruta 3. Elaboración propia.

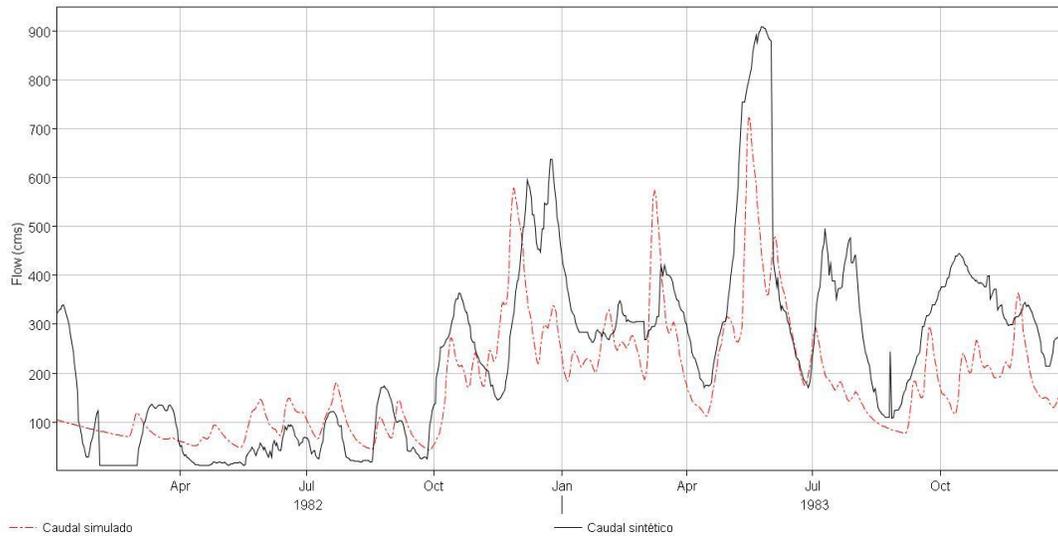
Años	Qmed IPH	Qmed Anuario
1978	65.2071731	76.48
1979	145.87353	260.66
1980	113.062635	176.87
1981	97.7562625	146.83
1982	185.736977	192.19
1983	454.798944	345.65
1984	256.792166	232.25
1985	127.501235	163.78
1986	138.173799	228.06
1987	607.71496	260.31
1988	114.211116	162.05
1989	221.155038	154.87
1990	176.162085	203.45
1991	88.9805276	189.68
<b>Promedio</b>	<b>199.509032</b>	<b>199.5092857</b>



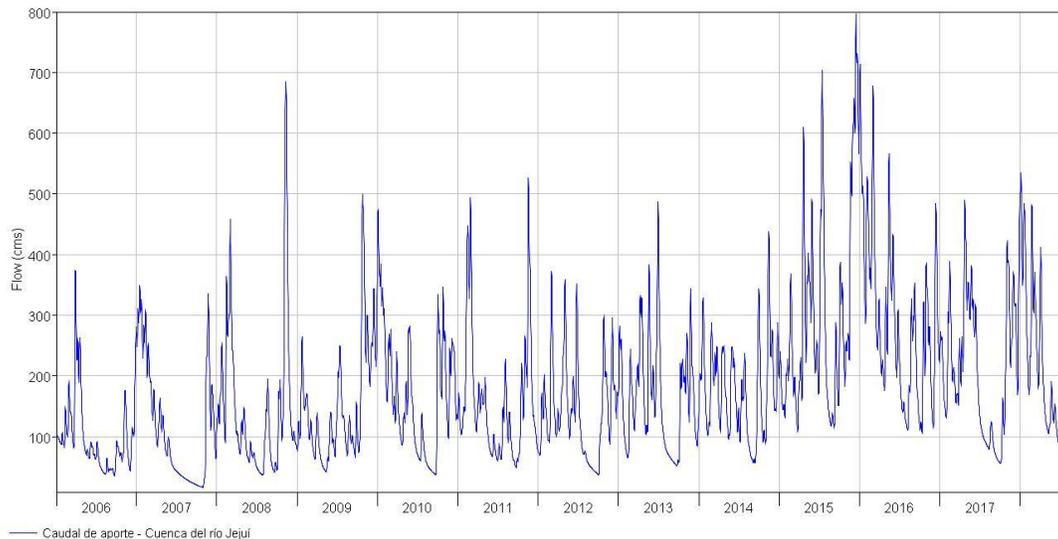
**Figura 73.** Caudales sintéticos generados en la estación Cruce Ruta 3. Río Jejuí

▪ **Proceso de ajustes de caudales**

El periodo de calibración fue establecido entre el 02 de Enero de 1982 y el 31 de Diciembre de 1983. Se muestra el resultado del proceso en la Figura 74, en donde se tiene un ajuste adecuado a lo largo del periodo de simulación, acompañando en general la frecuencia de los caudales sintéticos. El ajuste se consideró satisfactorio y se generaron los caudales de aporte al río Paraguay en el periodo del 2006 al 2018 (Figura 75).



**Figura 74.** Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Jejuí. Elaboración propia.



**Figura 75.** Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca del río Jejuí.

### 3.1.1.3.5. Cuenca del río Manduvirá

La calibración se realizó con los datos de la estación ubicada en TobatíTuyá (Figura 76), recopilados del anuario hidrográfico de la ANNP.

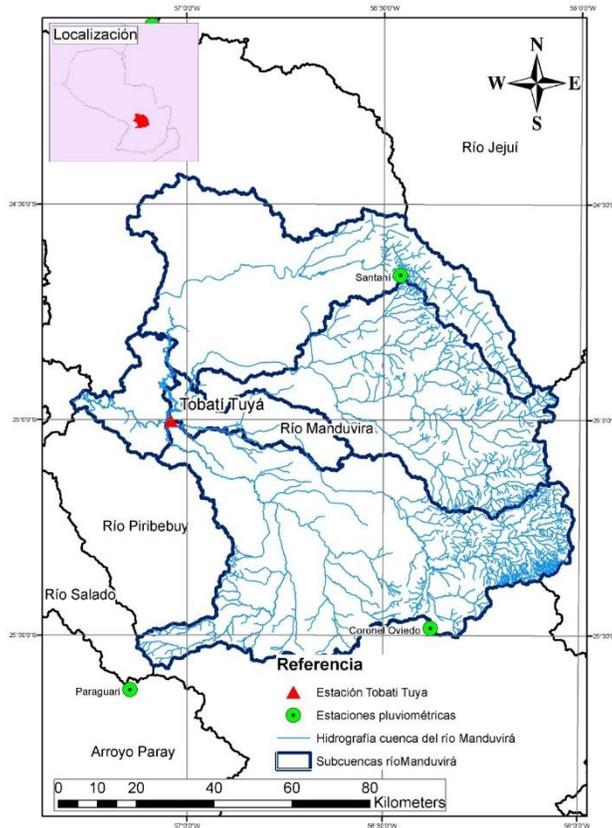


Figura 76. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Manduvirá. Elaboración propia.

#### ▪ Caudales sintéticos

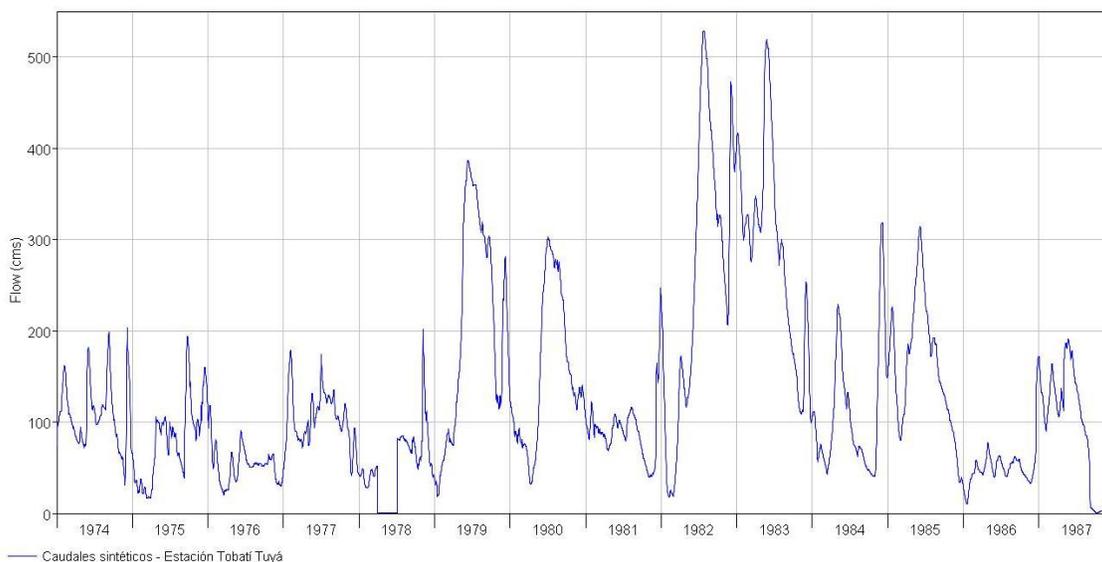
Se generaron caudales sintéticos a partir de los datos de nivel de la Estación TobatíTuyá, para el ajuste, no se tenían valores históricos de caudal como en los casos anteriores, sin embargo, se ajustaron los valores de acuerdo al valor promedio manejado en la bibliografía, donde el caudal promedio (17 años de registro - Balance Hídrico DINAC) del Río Manduvirá es 136 m<sup>3</sup>/s, equivalente a 456 mm de escorrentía (Toñánez, 2014), el resultado se muestra en la Tabla 20 y la Figura 75.

Tabla 20. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación TobatíTuyá. Elaboración propia.

MES	Q Sintético
Ene	116.938427
Feb	93.11156
Mar.	97.3985096
Abr.	119.288242
May.	172.564779

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

Jun.	205.076664
Jul.	184.836818
Ago.	168.823859
Sep.	133.384107
Oct.	101.228839
Nov.	103.093826
Dic.	136.252955
<b>Promedio</b>	<b>135.999882</b>



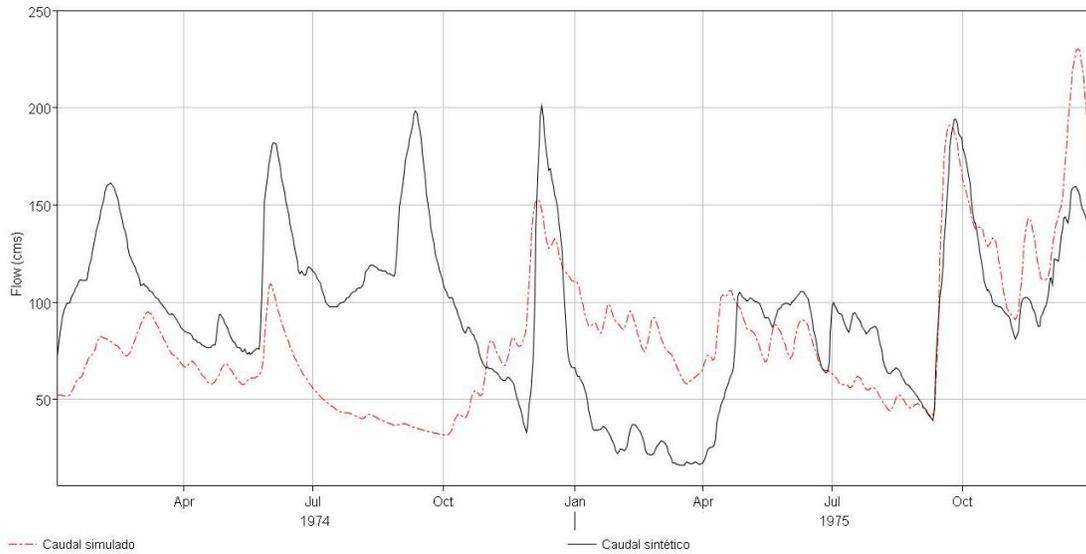
**Figura 77.** Caudales sintéticos generados en la estación TobatíTuyá. Elaboración propia.

Se tienen también datos de caudal medido en la misma estación, constando de doce registros entre el año 1971 y el 1991, con lo cual fue posible establecer una curva H-Q y una ecuación que se ajuste a la misma, sin embargo, los caudales convertidos a partir de ésta superan el promedio establecido en casi 100 m<sup>3</sup>/s, y al realizar la calibración, los resultados quedan muy por debajo de estos valores, por lo que se optó por utilizar los caudales determinados a partir del método Área – Pendiente, los cuales varían solo en magnitud, pero se ajustan mejor al modelo.

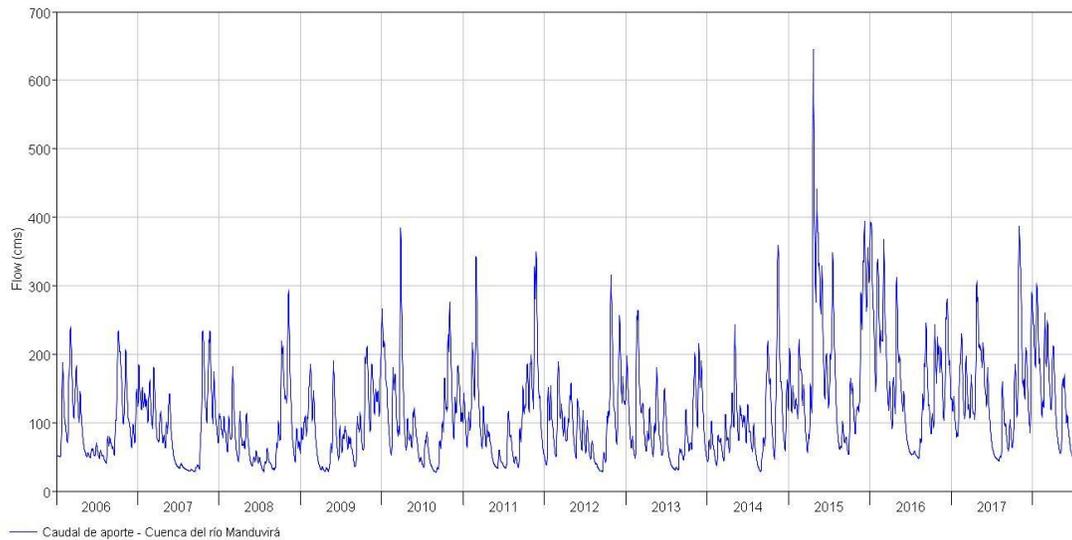
- *Proceso de ajuste de caudales*

De acuerdo a lo detallado, se ajustó el modelo con los datos de la estación TobatíTuyá, el periodo de simulación seleccionado fue del 04 de Enero de 1974 al 31 de Diciembre de 1975, el resultado se muestra en la Figura 78. Al inicio del periodo de simulación, se observa una frecuencia similar pero con una diferencia de magnitud notable, esto se puede deber a la escasez en los datos de precipitación, los cuales no logran representar correctamente la variabilidad que ocurre dentro de una cuenca de mayor tamaño como esta, el ajuste mejora al final del periodo y en general, no es óptimo, pero se los considera aceptable para los efectos del proyecto, como se mencionó anteriormente, de haber desfases muy grandes, éstos se notan en el modelo hidráulico y se

pueden corregir de esta forma. Con los parámetros establecidos, se generaron los caudales de aporte a dicho modelo (Figura 79).



**Figura 78.** Calibración del modelo hidrológico cuenca del río Manduvirá. Elaboración propia.



**Figura 79.** Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico cuenca río Manduvirá

### 3.1.2. Resultados Obtenidos en la Modelación Hidrodinámica

Tal como se explicó en el capítulo anterior, el sistema completo a ser modelado con Hec Ras en el río Paraguay entre Puerto Murtiño y Pilar se muestra en la figura 10 del capítulo 2, donde se tiene un caudal de entrada diario en Murtiño (ANA, Brasil); los caudales laterales de las sub cuencas Apa, Aquidaban, Ypane, Jejui y Manduvira. (Modelación continua en Hec Hms) y los niveles hidrométricos diarios en Pilar, como condición de borde

El periodo de calibración seleccionado fue desde el 2012 al 2018 (7 años), mientras que el periodo de validación fue desde el 2006 al 2011 (4 años).

#### 3.1.2.1. Evaluación de desempeño del Modelo Hidrodinámico

##### 3.1.2.1.1. Periodo de Calibración

La evaluación de desempeño del modelo fue realizada con las siguientes funciones objetivo:

- Diferencia de Valores Medios (MED): es una medida del corrimiento sistemático del nivel calculado respecto del observado. Un valor nulo indica que no existe corrimiento.

$$MED = \overline{H_{SIM}} - \overline{H_{OBS}} \quad (13)$$

Donde:

$\overline{H_{SIM}}$  = promedio de niveles simulados

$\overline{H_{OBS}}$  = promedio de niveles observados

- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): la Raíz del Error Cuadrático Medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El rango de valores puede ir desde 0 hasta infinito. El 0 corresponde a un ajuste perfecto.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{SIM_i} - H_{OBS_i})^2} \quad (14)$$

Donde:

$H_{SIM_i}$  = niveles simulados

$H_{OBS_i}$  = niveles observados

$n$  = cantidad de datos de la serie

- Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE): es un estadístico normalizado que indica cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Varía entre  $-\infty$  y 1, donde 1 es un ajuste óptimo. Valores negativos indican que la media de los datos observados es un mejor predictor que los valores simulados.

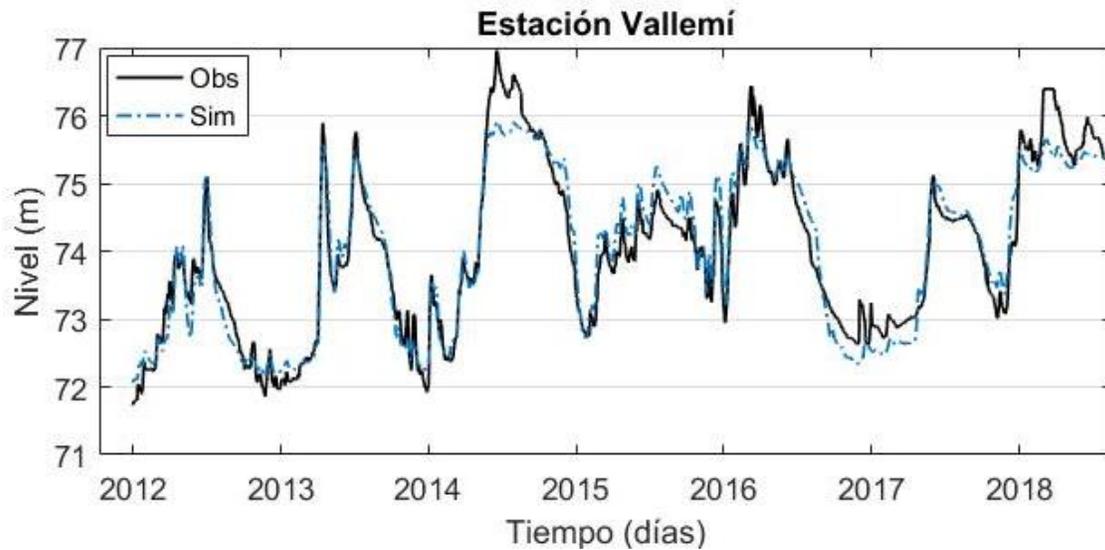
$$NSE = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - H_{SIM_i})^2 \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}})^2 \right]} \quad (15)$$

De acuerdo al criterio de Molnar (2011), la evaluación del desempeño del modelo en base al estadístico NSE se da como se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 21.** Criterio de Molnar (2011) para evaluación del desempeño en base al NSE.

NSE	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos en el periodo de calibración para cada estación hidrométrica. En la Tabla 22 se muestra un resumen del desempeño del modelo.



**Figura 80.** Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Calibración).

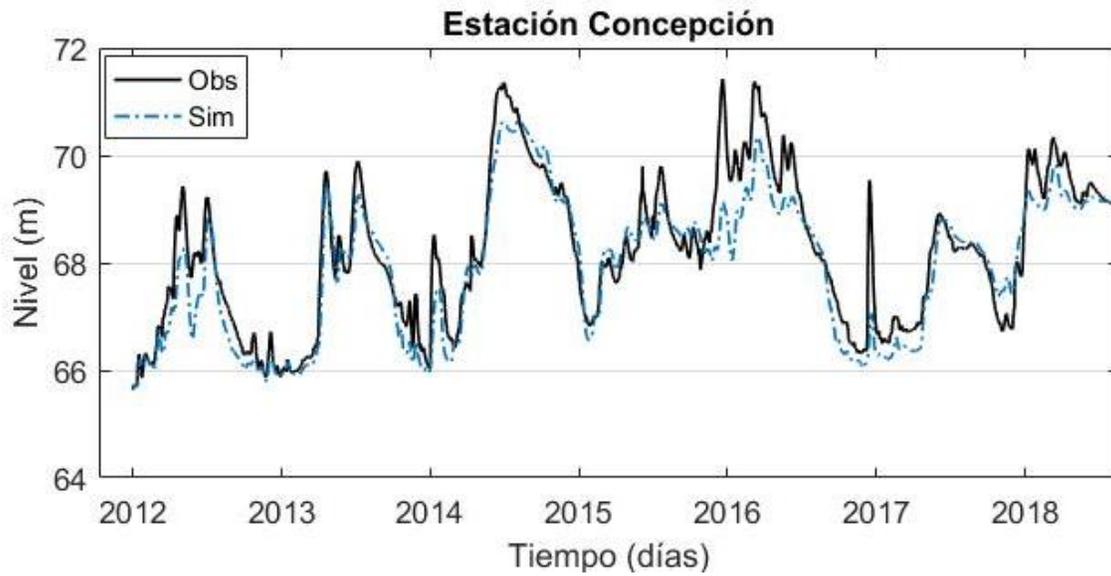


Figura 81. Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Calibración).

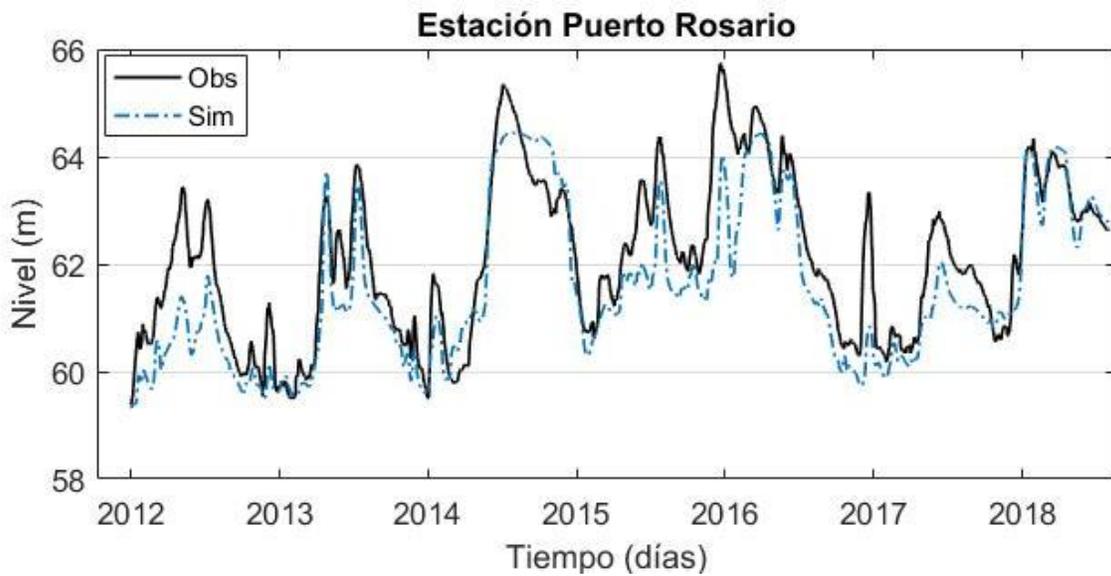


Figura 82. Niveles Simulados y Observados en la Estación Pto. Rosario (Periodo de Calibración).

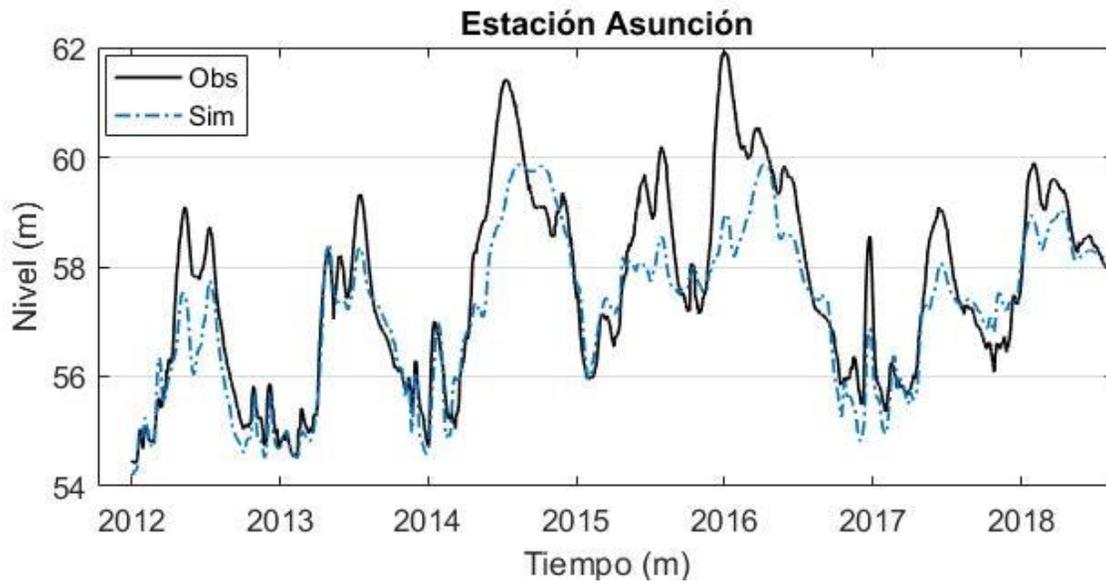


Figura 83. Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Calibración).

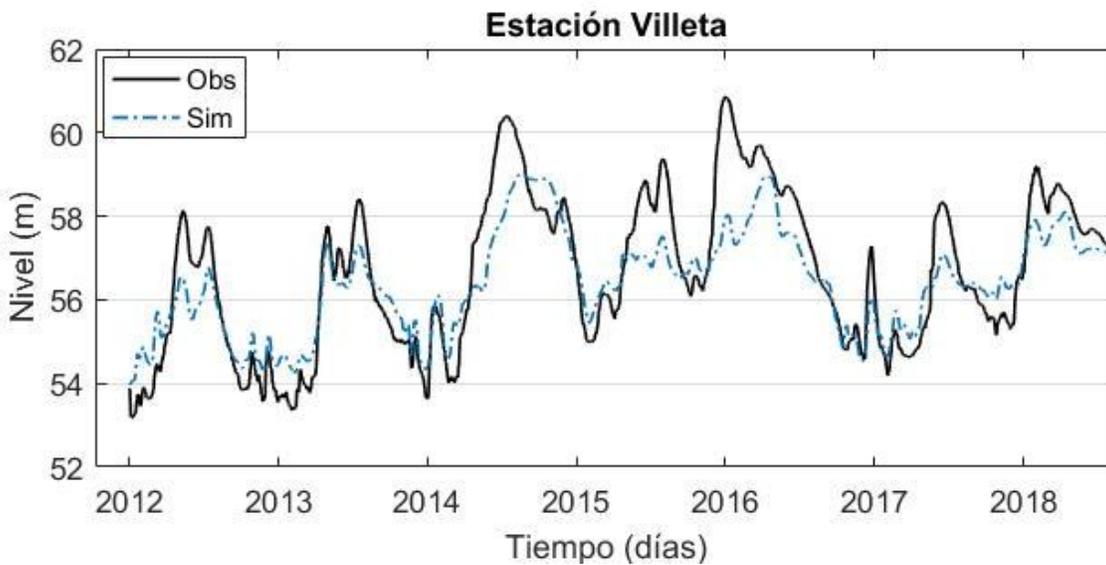


Figura 84. Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Calibración).

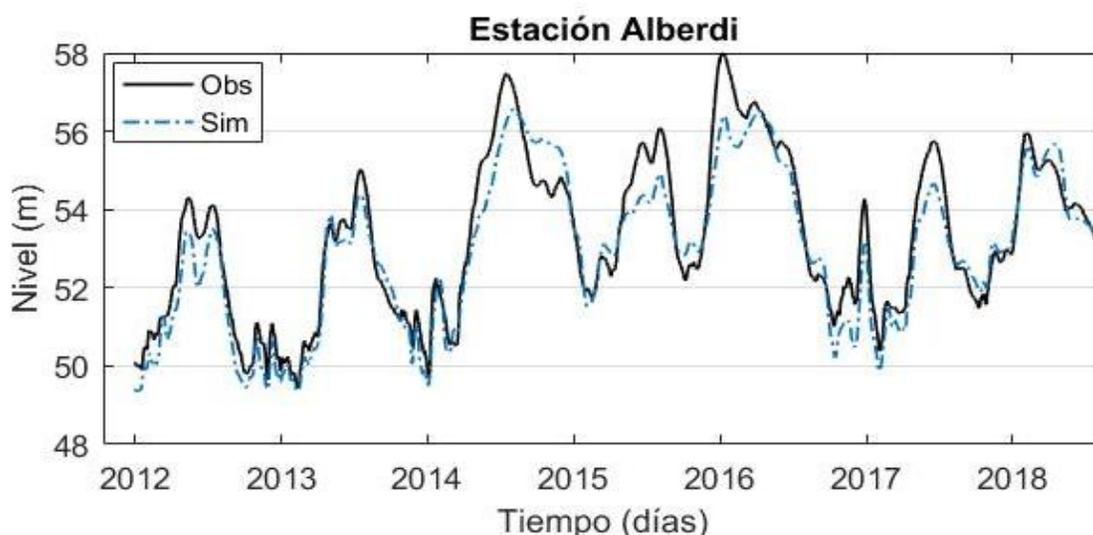


Figura 85. Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Calibración).

Tabla 22. Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Calibración.

Estación	MED	RMSE	NSE	Desempeño
VALLEMÍ	0.32	0.30	0.93	Excelente
CONCEPCIÓN	0.87	0.77	0.60	Bueno
ROSARIO	0.72	0.67	0.76	Muy Bueno
ASUNCIÓN	0.86	0.65	0.76	Muy Bueno
VILLETA	0.93	0.48	0.74	Muy Bueno
ALBERDI	0.74	0.59	0.86	Excelente

Obs: evaluación de desempeño en base al criterio de Molnar (2011), especificado en la tabla 21.

### 3.1.2.1.2. Periodo de Validación

Refsgaard & Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables. El periodo de validación seleccionado es 2006 – 2011 (4 años). Los resultados obtenidos en cada estación se muestran en las siguientes figuras, mientras que en la Tabla 23 se muestra un resumen de las Funciones Objetivo que evalúan el desempeño.

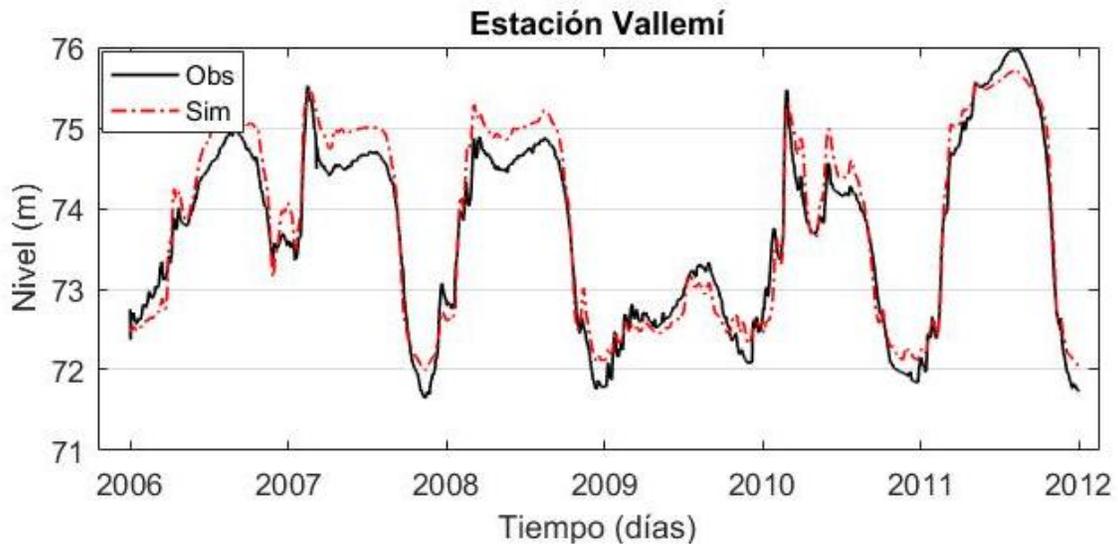


Figura 86. Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Validación).

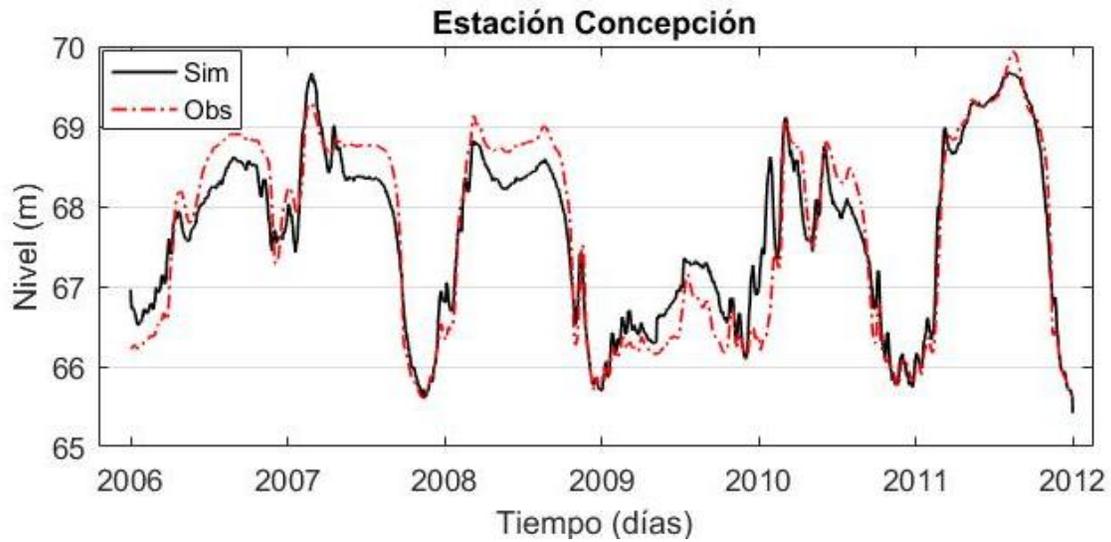


Figura 87. Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Validación).

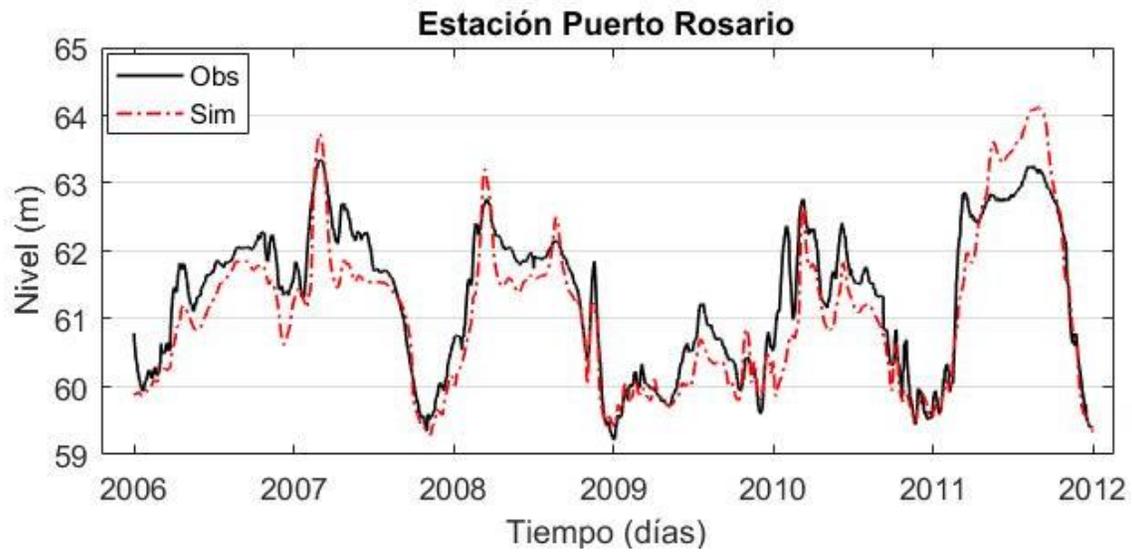


Figura 88. Niveles Simulados y Observados Estación Puerto Rosario (Periodo de Validación).

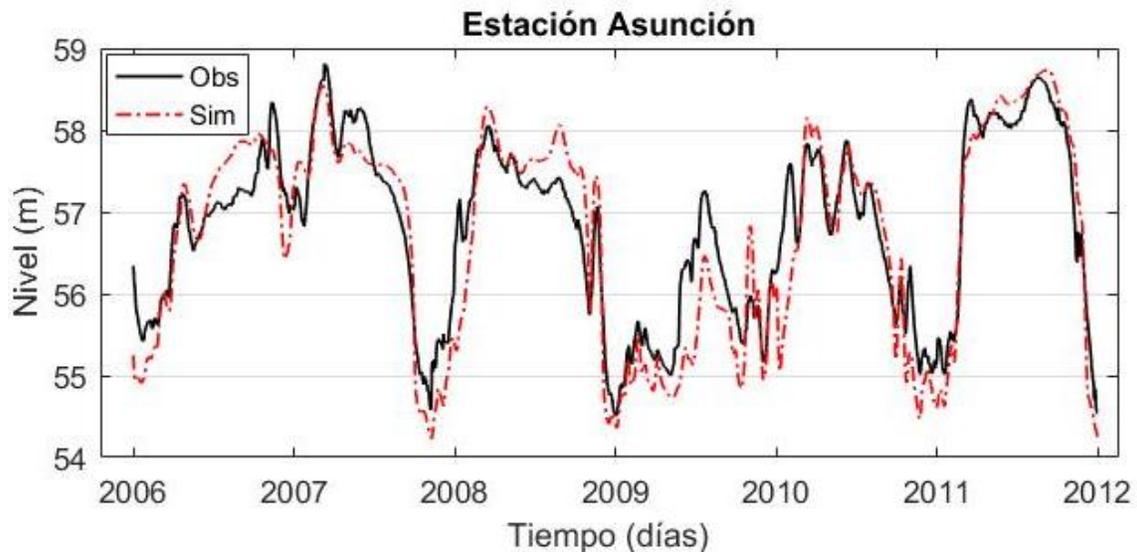


Figura 89. Niveles Simulados y Observados Estación Asunción (Periodo de Validación).

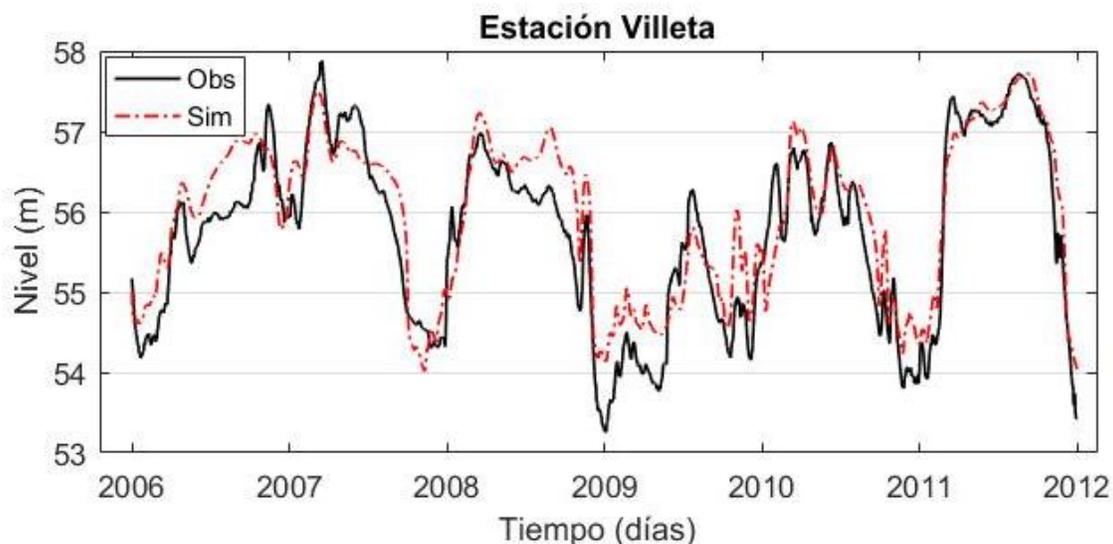


Figura 90. Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Validación).

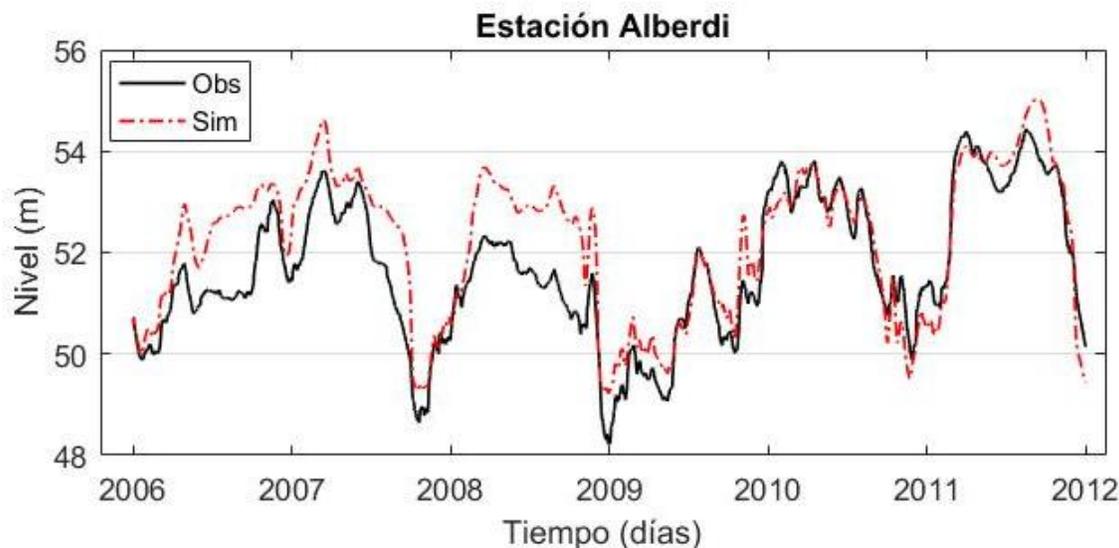


Figura 91. Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Validación).

Tabla 23. Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Validación.

Estación	MED	RMSE	NSE	Desempeño
VALLEMÍ	0.13	0.28	0.94	Excelente
CONCEPCIÓN	0.02	0.38	0.87	Excelente
ROSARIO	0.24	0.47	0.80	Excelente
ASUNCIÓN	-0.09	0.49	0.79	Muy Bueno
VILLETA	0.24	0.48	0.81	Excelente
ALBERDI	0.54	0.85	0.63	Muy Bueno

Obs: evaluación de desempeño en base al criterio de Molnar (2011), especificado en la Tabla 14.

### 3.2. Operacionalización de Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH)

En la fase de culminación del proceso de calibración y validación, se tomo contacto oficial con el Centro Internacional de Hidroinformatica de la Itaipu – Lado Paraguayo, a fin de solicitar el apoyo del equipo de especialistas del Centro para iniciar un proceso de automatización de los modelos hidrológicos e hidráulico con vista a generar subsidios para una ulterior instalación en la unidad operativa de la Gerencia de Hidrologia de la Direccion de Meteorologia e Hidrologia DMH-DINAC, institución que cuenta con una división de pronósticos hidrológicos, en proceso de fortalecimiento.

Posterior a un análisis de viabilidad con una revisión de todo lo desarrollado en la investigación en la UC, se evaluo la viabilidad de diseñar procesos de acople de los modelos a la plataforma informática del CIH, ya operativa. A ese efecto se realizó la implementación de los requerimientos en tres componentes principales que abarcan desde procesamientos por lotes (modo batch) hasta el desarrollo de interfaces de visualización WEB, a continuación más detalles de los mismos.

#### 3.2.1. Componente HMS

El objetivo es acoplar los modelos Hidrológicos del proyecto de investigación de la UC (HEC-HMS) a la plataforma tecnológica del CIH, utilizando datos meteorológicos almacenados en el CIH, y dejarlas de manera operativa (A partir de lluvias obtener caudal), generando insumos para las corridas del modelo hidrodinámico (HEC-RAS). Todo el volumen de información de cada corrida es guardada en el banco de datos del CIH, utilizando servidores y soporte tecnológico del Centro. Las tareas llevadas a cabo en la componente:

- Diseño del esquema de funcionamiento de las corridas de los modelos hidrológicos, desde el pre-procesamiento de las entradas necesarias hasta el almacenamientos de los resultados en armonía con la base de datos del CIH.
- Desarrollo de un proceso, utilizando el lenguaje de programación Python, que permite ejecutar los modelos en batch (Script de ejecución). Características de la corrida de los modelos:
  - Las entradas de los modelos, provienen de datos pre-procesados de estaciones hidrometereologicas almacenados en YRATO (Precipitación), previamente asociadas a las cuencas del proyecto HEC-HMS. Actualmente las entradas de precipitación son generados a partir de datos de sensoramiento remoto del GPM (Datos cada 30 min) en combinación con previsiones extraídas del ECMWF (Pronósticos a 12 días).
  - Las variables de salida son almacenadas completamente en la base de datos del CIH, todas ellas relacionada a un nodo del modelo.
- Desarrollo de paneles de visualización de resultados de las corridas de los modelos hidrológicos. Dichos resultados pueden ser desplegados a través de los nodos representados en el visualizador de mapas del aplicativo, figura 92.

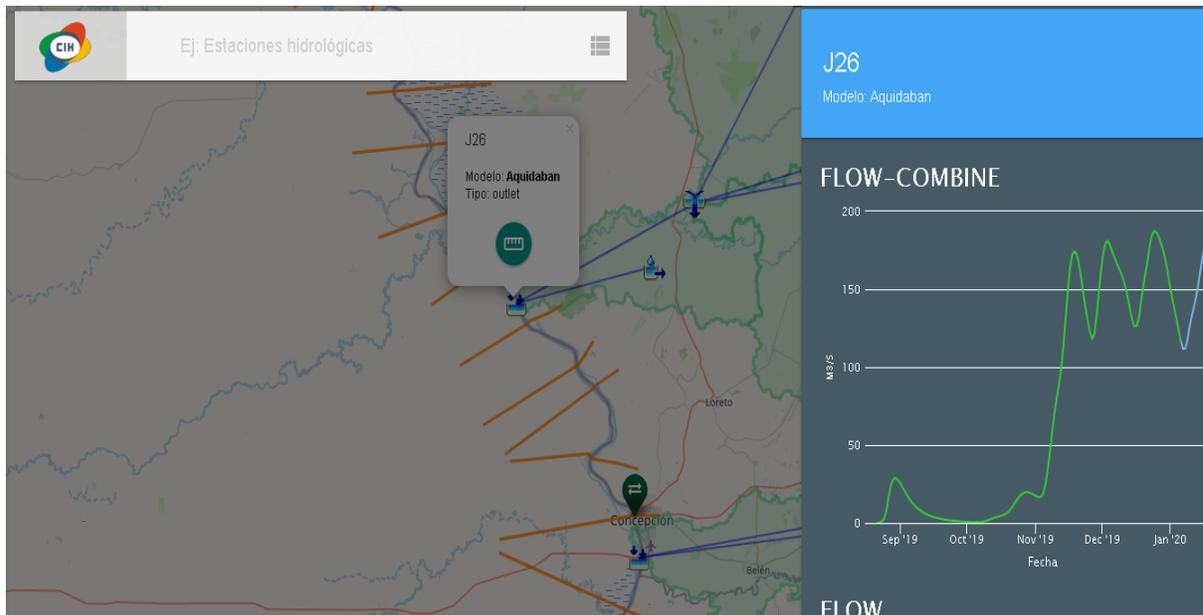


Figura 92. Panel HMS del proyecto en YRATO (CIH).

### 3.2.2. Componente RAS

El objetivo fue de acoplar el modelo Hidrodinámico del proyecto a la plataforma tecnológica del CIH y dejarlas de manera operativa, utilizando resultados de los modelos hidrológicos e hipótesis tomadas en las condiciones de borde. Características de la corrida del modelo:

- Diseño del esquema de funcionamiento de las corridas de los modelos hidrodinámicos, desde el pre-procesamiento de las entradas necesarias hasta el almacenamientos de los resultados en armonía con la base de datos del CIH.
- Caudal de afluentes son obtenidos de las corridas de los modelos hidrológicos del proyecto.
- En las condiciones de bordes fueron tomadas algunas hipótesis para las previsiones. Teniendo en cuenta que los modelos hidrológicos cuentan con pronósticos de caudales en un horizonte de 12 días:
  - Condición de borde, Caudal en Estación Porto Murtinho: el último dato capturado de caudal es tomado para los siguientes 12 días.
  - Condición de borde, Nivel en Estación Pilar: el último dato capturado de nivel es tomado para los siguientes 12 días.
- Desarrollo de un proceso, utilizando el lenguaje de programación Python, que permite ejecutar los modelos en batch (Script de ejecución).
- Desarrollo de paneles de visualización de resultados de las corridas de los modelos hidrodinámicos (figura 93). Dichos resultados pueden ser desplegados a través de las secciones representadas en el visualizador de mapas del aplicativo.

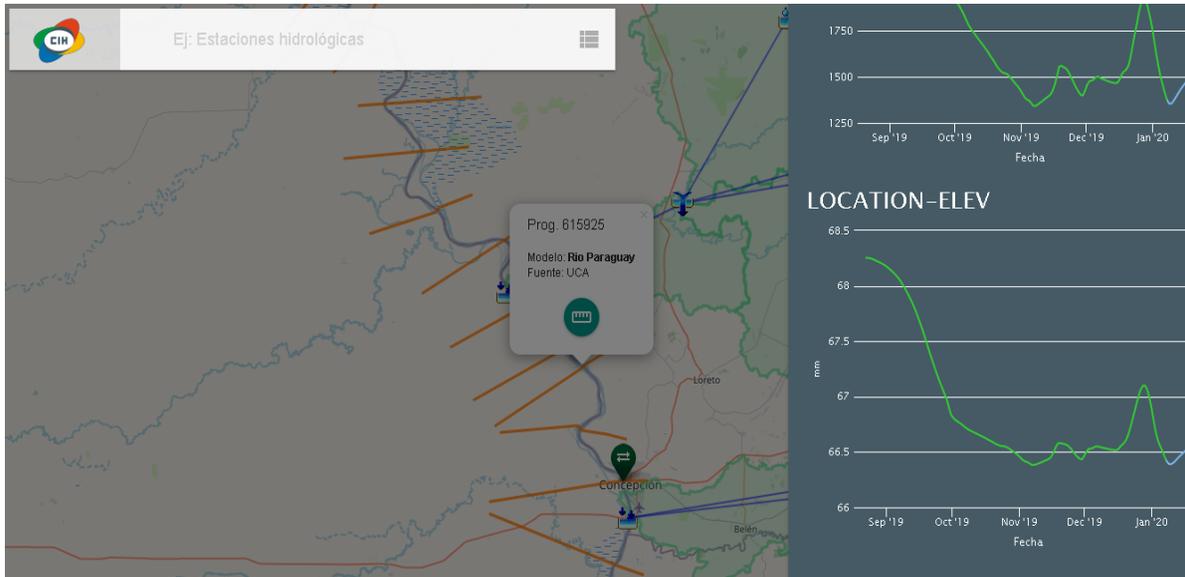


Figura 93. Panel RAS en YRATO.

### 3.2.2.1. Integración HMS – RAS (Hidrológico + Hidráulico)

Esta componente se encarga de sincronizar y automatizar los procedimientos en batch desarrollados para la ejecución de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. El mismo fue desarrollado en el lenguaje de programación Python y cuenta con las siguientes características:

- Ejecución sistémica y automática todos los días a las 10:00 am.
- Los modelos hidrológicos son ejecutados inicialmente para luego servir de insumo en los modelos hidrodinámicos.
- Los datos son disponibilizados de manera automática en la plataforma YRATO, una vez que las corridas hayan finalizado.
- Todos los scripts de ejecución y modelos se realizan en un servidor destinado exclusivamente a ello dentro de la infraestructura informática de la ITAIPIU BINACIONAL.

El aplicativo WEB se encuentra en un ambiente de producción experimental, por lo que su acceso es posible a través del siguiente enlace: <https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/yrato/>.

## 3.3. Modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción

### 3.3.1. Caso A

Una primera consideración que se tuvo para armar la serie para la previsión de niveles consistió en identificar si el año que se quiere predecir está clasificado como Niña o Niño.

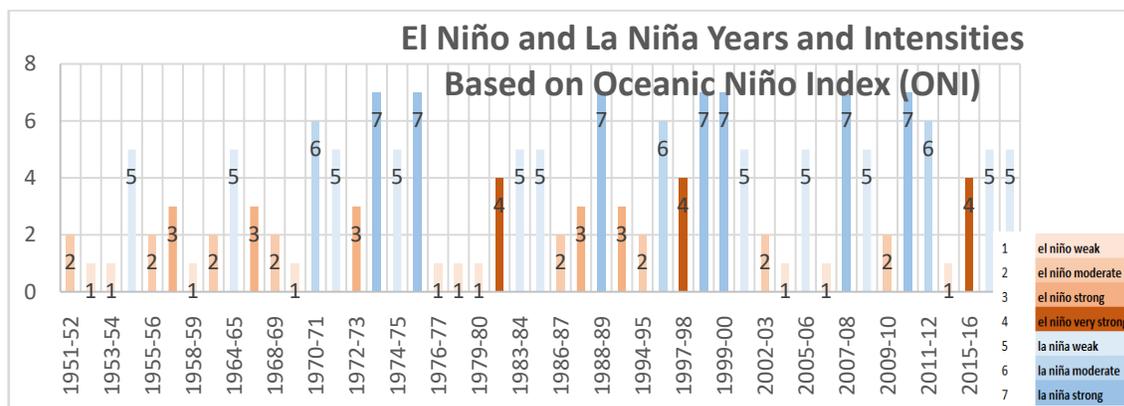
Una vez hecho esto, se procedió a armar la serie histórica con todos los años pertenecientes a la categoría identificada. De esta serie, se toman valores hasta la fecha en que se tienen datos del año a predecir. Eso se toma como variable independiente “x” para la regresión lineal, y los datos hasta la fecha del año para el que se quieren prever los niveles, se considera como la variable “y”.

Para este caso se consideran solo puntos de una misma estación. Ejemplo: Asunción considera solo los históricos de Asunción.

Para armar la serie histórica de años Niñas o Niños se tuvo en cuenta la tabla 24, que expone una clasificación de años Niña y Niño de acuerdo a las intensidades (débil, moderado, fuerte y muy fuerte), en base al ONI (Oceanic Niño Index), como se muestra en la figura 94.

**Tabla 24.** Años Niño y Niña e intensidades basados en el ÍNDICE OCEÁNICO EL NIÑO (ONI)

El Niño				La Niña		
Weak - 10	Moderate - 7	Strong - 5	Very Strong - 3	Weak - 10	Moderate - 4	Strong - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
				2017-18		



**Figura 94.** El Niño y la Niña Año-Intensidades basado en el ONI.

En la figura 95 se presenta el promedio histórico diario de años Niñas y Niños de la serie de Asunción y los datos de niveles medidos en 2018, hasta julio. Gráficamente, no se observa mucha correlación entre las curvas, sino a partir de mediados de mayo (13/05) aproximadamente.

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

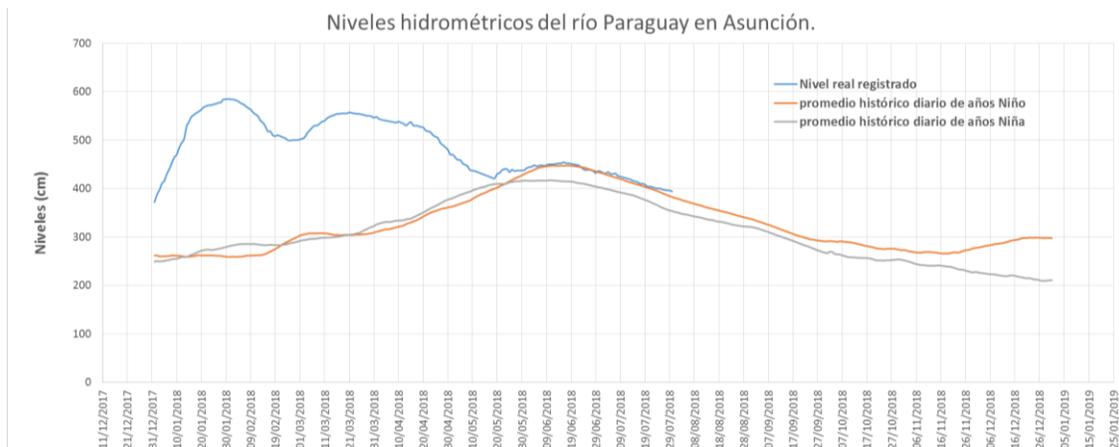


Figura 95. Curvas de promedio histórico de años Niña y Niño y de Asunción 2018.

Los datos se organizan de la forma mostrada en la tabla 25. No se tuvo en cuenta los días 29 de febrero para los promedios históricos. Se realizó la previsión para el año 2018 en la estación de Asunción. Como 2018, en su momento se encontraba clasificado según el ONI como La Niña débil, entonces se toman los años pertenecientes a la Niña (débil, moderada y fuerte) para armar una serie con los promedios históricos diarios.

Tabla 25. Organización de datos de nivel en Asunción.

		Nivel real registrado	Promedio histórico	
			Años niño	Años niña
<b>desde</b>	13/05/2018	432.0	387.0	401.3
<b>hasta</b>	13/07/2018	419.0	412.6	387.3

Se realizaron 4 previsiones, teniendo en cuenta los siguientes periodos para determinar los coeficientes de la ecuación de regresión lineal (tabla 26).

- 1º previsión: del 13 de mayo al 13 de julio.
- 2º previsión: del 13 de mayo al 30 de julio (+17 días que la primera previsión).
- 3º previsión: del 13 de mayo al 6 de agosto (+7 días que la segunda previsión).
- 4º previsión: del 13 de mayo al 13 de agosto. (+ 7 días que la tercera previsión).

Tabla 26. Coeficientes de las ecuaciones de regresión lineal para cada previsión.

		previsiones	#1	#2	#3	#4
<b>y=mx+b</b>	coeficientes	<b>b</b>	65.209	81.270	96.447	103.802
		<b>m</b>	0.913	0.874	0.836	0.818

De acuerdo a la tabla de la figura 94, se maneja que:

Variable x: promedio histórico diario de la serie de años Niña

Variable y: datos reales registrados de niveles en Asunción.

Para los resultados, se usaron las funciones de análisis de datos de la aplicación de hojas de cálculo Excel.

De la 1era previsión a la 4ta, se agregó 1 mes de datos y se ve como disminuyó el error de las previsiones. Resaltados en rosado, se presentan las previsiones de menor error, respecto a los niveles reales registrados.

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

2018	Niveles reales medidos en Asunción	años Niña		años Niña		años Niña	
		prevision #1	real-prev.	prevision #2	real-prev.	prevision #3	real-prev.
14 de julio	416	417.81	-1.81				
15 de julio	415	416.34	-1.34				
16 de julio	413	414.60	-1.60				
17 de julio	410	412.52	-2.52				
18 de julio	410	411.00	-1.00				
19 de julio	408	408.98	-0.98				
20 de julio	404	407.32	-3.32				
21 de julio	404	405.27	-1.27				
22 de julio	403	403.22	-0.22				
23 de julio	401	401.04	-0.04				
24 de julio	400	399.10	0.90				
25 de julio	400	396.47	3.53				
26 de julio	398	394.45	3.55				
27 de julio	397	392.40	4.60				
28 de julio	396	390.74	5.26	392.67	3.33	396.06	-0.06
29 de julio	396	388.94	7.06	390.94	5.06	394.54	1.46
30 de julio	394	388.06	5.94	390.10	3.90	392.89	1.11
31 de julio	393	386.40	6.60	388.51	4.49	392.08	0.92
1 de agosto	392	385.45	6.55	387.61	4.39	390.56	1.44
2 de agosto	392	384.15	7.85	386.36	5.64	389.70	2.30
3 de agosto	391	382.63	8.37	384.91	6.09	388.50	2.50
4 de agosto	389	381.91	7.09	384.22	4.78	387.11	1.89
5 de agosto	388	381.16	6.84	383.50	4.50	386.45	1.55
6 de agosto	387	380.25	6.75	382.63	4.37	385.77	1.23
7 de agosto	386	378.89	7.11	381.33	4.67	384.93	1.07
8 de agosto	384	377.84	6.16	380.33	3.67	383.69	0.31
9 de agosto	383	377.15	5.85	379.67	3.33	382.73	0.27
10 de agosto	384	376.24	7.76	378.79	5.21	382.09	1.91
11 de agosto	384	375.32	8.68	377.92	6.08	381.26	2.74
12 de agosto	384	373.80	10.20	376.46	7.54	380.42	3.58
13 de agosto	384	372.50	11.50	375.22	8.78	379.02	4.98
14 de agosto	384	371.64	12.36	374.40	9.60	377.83	6.17
15 de agosto	384	371.39	12.61	374.16	9.84	377.05	6.95
16 de agosto	384	370.34	13.66	373.15	10.85	376.82	7.18
17 de agosto	384	368.65	15.35	371.54	12.46	375.86	8.14
18 de agosto	382	368.02	13.98	370.93	11.07	374.31	7.69
19 de agosto	380	367.46	12.54	370.40	9.60	373.73	6.27
20 de agosto	379	366.58	12.42	369.55	9.45	373.22	5.78
21 de agosto	379	365.36	13.64	368.39	10.61	372.41	6.59
22 de agosto	382	364.42	17.58	367.49	14.51	371.29	10.71
23 de agosto	381	362.87	18.13	366.00	15.00	370.43	10.57
24 de agosto	380	361.90	18.10	365.08	14.92	369.01	10.99
25 de agosto	380	361.15	18.85	364.36	15.64	368.13	11.87
26 de agosto	381	360.54	20.46	363.78	17.22	367.44	13.56
27 de agosto	380	359.66	20.34	362.93	17.07	366.88	13.12
28 de agosto	380	359.10	20.90	362.40	17.60	366.07	13.93
29 de agosto	380	359.13	20.87	362.43	17.57	365.57	14.43
30 de agosto	379	358.41	20.59	361.74	17.26	365.59	13.41
31 de agosto	377	358.08	18.92	361.42	15.58	364.93	12.07

Figura 96. Primera previsión, agosto 2018.

A excepción de 3 fechas, del 28 de julio al 31 de agosto, comparando los resultados de las 4 previsiones, los errores van disminuyendo de la primera a la segunda, de la segunda a la tercera, y de la tercera a la cuarta previsión.

Posteriormente, se tuvieron datos de nivel real registrado hasta el 13/08.

Bajo esto, se tienen las siguientes consideraciones:

- Periodo para la regresión y los coeficientes: 13-05 al 13-08.
- Variable de entrada (x): promedios históricos diarios en Asunción, de años niña.
- Variable de salida (y): niveles reales del rio Paraguay en Asunción.

Se utilizaron los coeficientes de la 4ta previsión para una previsión hasta el 15/10 considerando que el río seguirá el comportamiento promedio histórico de años niña.

Ahora, tomando como reales los valores previstos hasta el 15 de octubre, se realizó una nueva regresión teniendo en cuenta el periodo de 13/05 al 15/10, y las siguientes variables:

- Variable de entrada (x): promedios históricos diarios en Asunción, de años Niño.
- Variable de salida (y): niveles reales del rio Paraguay en Asunción.

Con esto, se obtuvo valores hasta el 31/12/2018 (figura 97). Se consideró también que el río seguirá la tendencia histórica de años niñas hasta el 15 de octubre y de años niños hasta diciembre. Por lo que estos límites definieron si la previsión es con años Niña o Niño.

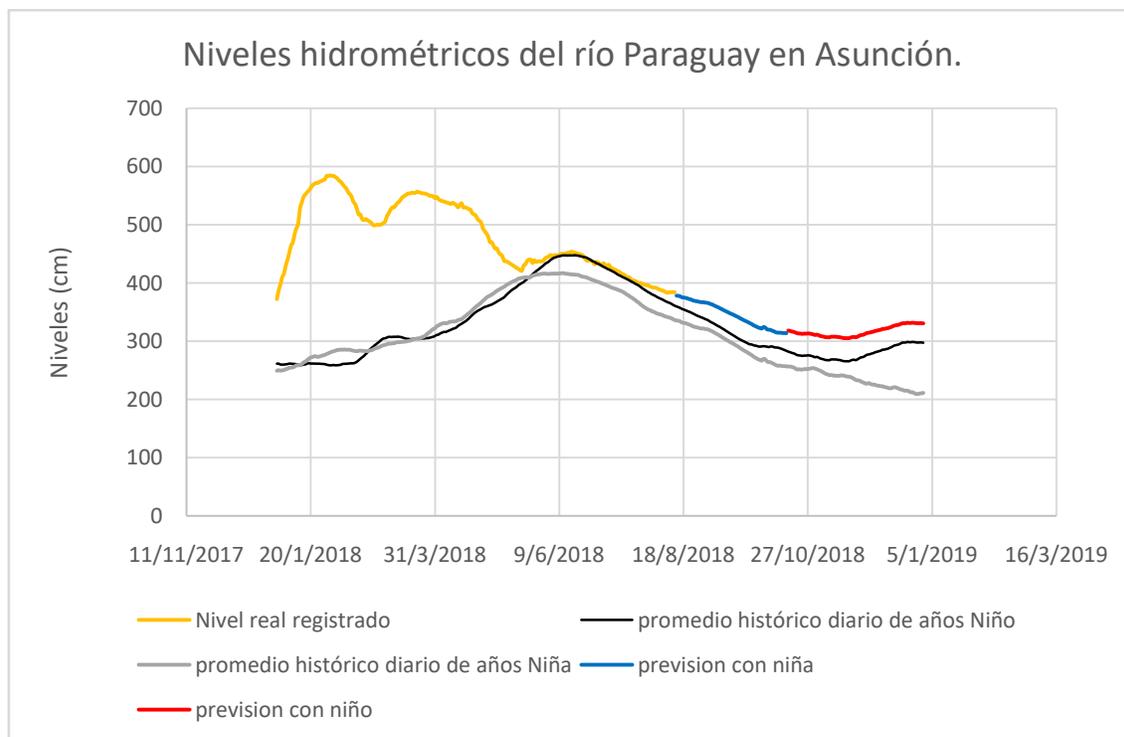


Figura 97. Pronostico Asunción con promedio histórico de Niña y Niño, julio a diciembre 2018.

### 3.3.2. Caso B

En este caso, la previsión de niveles del río Paraguay en Asunción se realizó mediante la correlación con Concepción, una estación que se encuentra aguas arriba de Asunción.

Primeramente, se tomaron 3 estaciones para ver la correlación con Asunción: Bahía Negra, Concepción y Pilar. Como Concepción es la que mejor correlación presenta con Asunción, entonces las siguientes pruebas para previsión de niveles en Asunción se hicieron con dicha estación. Tabla 27.

Para ver el tiempo de traslado de la onda de Concepción hasta Asunción se realizaron pruebas añadiendo un tiempo de desfase variable, y se analizó la correlación alcanzada entre las dos estaciones (tabla 27). A continuación, se detallan los resultados para el periodo de 2010 al 2018.

**Tabla 27.** Correlación Concepción-Asunción periodo 2010-2018.

Tiempo de desfase de Asunción	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
t=1	0.944	0.967	0.951	0.951	0.956	0.919	0.918	0.902	0.746
t=3	0.958	0.974	0.965	0.965	0.962	0.931	0.929	0.897	0.799
t=5	0.962	0.977	0.973	0.970	0.962	0.936	0.935	0.884	0.839
t=7	0.958	0.976	0.973	0.967	0.959	0.935	0.936	0.865	0.863
t=9	0.946	0.972	0.969	0.957	0.953	0.927	0.933	0.843	0.871
t=12	0.918	0.959	0.956	0.932	0.939	0.905	0.922	0.805	0.846
t=15	0.883	0.939	0.937	0.899	0.921	0.871	0.907	0.765	0.797
t=17	0.860	0.922	0.922	0.873	0.907	0.840	0.897	0.736	0.757
t=20	0.828	0.892	0.895	0.830	0.882	0.785	0.884	0.690	0.688

Respecto a t=1 en el 2017, no se ha encontrado una correlación con la cantidad de precipitación en ese año, del 2000 al 2017, fue 2015 el año de mayor cantidad de precipitación y 2013 el de menor.

Se puede ver que en este periodo, los resultados de las correlaciones son menos dispersos que para el periodo 1979-98, considerando que las mejores correlaciones oscilan entre 5 y 7 días de desfase para Asunción respecto a Concepción, excepto en 2017. (El resultado de 2018 no entra en análisis).

Se tomó desde el 1/05/2018 al 1/07/2018 (fechas para los niveles de Concepción), 2 meses para la regresión, para una previsión de 31 días: del 7/07/2018 al 7/08/2018 (fecha para los niveles de Asunción, ya que se consideró un desfase de 5 días de los niveles del río Paraguay en Asunción respecto a Concepción). Las diferencias entre lo real registrado y lo previsto están por debajo de los 20cm para los 31 días. Los resultados se muestran en la tabla 28 y la figura 98. De esta forma se tiene que:

- Tiempo para la regresión: del 1/05 al 1/07/2018 (fecha de Concepción).
- Tiempo para la previsión: del 2/07 al 2/08/2018 (fecha de Concepción).

Se estableció la estación de Asunción desfasada 5 días respecto a Concepción, debido a que es el tiempo de desfase que mejor correlación dio para el periodo 2000 a 2017.

**Tabla 28.** Periodo de previsión del 2/07 al 2/08/2018 para t=5.

fecha de Concepcion	niveles reales registrados		fecha de Asuncion	Forecast Lo80 R	diferencia
	NC	NA			
02/07/2018	487	431	07/07/2018	420.94	10.06
03/07/2018	485	426	08/07/2018	418.54	7.46
04/07/2018	481	425	09/07/2018	413.72	11.28
05/07/2018	480	423	10/07/2018	412.52	10.48
06/07/2018	480	422	11/07/2018	412.52	9.48
07/07/2018	480	420	12/07/2018	412.52	7.48
08/07/2018	480	419	13/07/2018	412.52	6.48
09/07/2018	480	416	14/07/2018	412.52	3.48
10/07/2018	480	415	15/07/2018	412.52	2.48
11/07/2018	480	413	16/07/2018	412.52	0.48
12/07/2018	478	410	17/07/2018	410.11	-0.11
13/07/2018	476	410	18/07/2018	407.70	2.30
14/07/2018	476	408	19/07/2018	407.70	0.30
15/07/2018	474	404	20/07/2018	405.29	-1.29
16/07/2018	475	404	21/07/2018	406.49	-2.49
17/07/2018	474	403	22/07/2018	405.29	-2.29
18/07/2018	474	401	23/07/2018	405.29	-4.29
19/07/2018	473	400	24/07/2018	404.08	-4.08
20/07/2018	474	400	25/07/2018	405.29	-5.29
21/07/2018	474	398	26/07/2018	405.29	-7.29
22/07/2018	473	397	27/07/2018	404.08	-7.08
23/07/2018	472	396	28/07/2018	402.87	-6.87
24/07/2018	472	396	29/07/2018	402.87	-6.87
25/07/2018	470	394	30/07/2018	400.46	-6.46
26/07/2018	470	393	31/07/2018	400.46	-7.46
27/07/2018	470	392	01/08/2018	400.46	-8.46
28/07/2018	470	392	02/08/2018	400.46	-8.46
29/07/2018	470	391	03/08/2018	400.46	-9.46
30/07/2018	469	389	04/08/2018	399.26	-10.26
31/07/2018	467	388	05/08/2018	396.84	-8.84
01/08/2018	466	387	06/08/2018	395.64	-8.64
02/08/2018	465	386	07/08/2018	394.43	-8.43

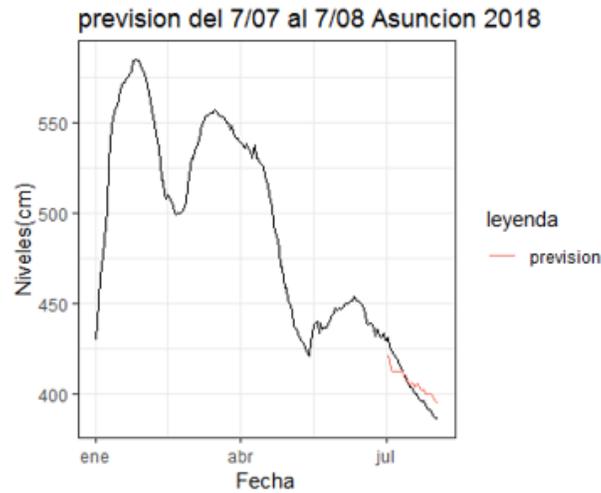


Figura 98. Periodo de previsión del 2/07 al 2/08/2018.  $t=5$ .

### 3.3.3. Caso C

Tomando los datos de Asunción, desde 1904 hasta 2018 se realizaron correlaciones anuales y trimestrales.

Para el 2018, los años de mejor correlación positiva dieron los siguientes coeficientes de correlación: 1971 con 2018= 0.973, 1933 con 2018= 0.782 y 1966 con 2018= 0.776 (figura 99).

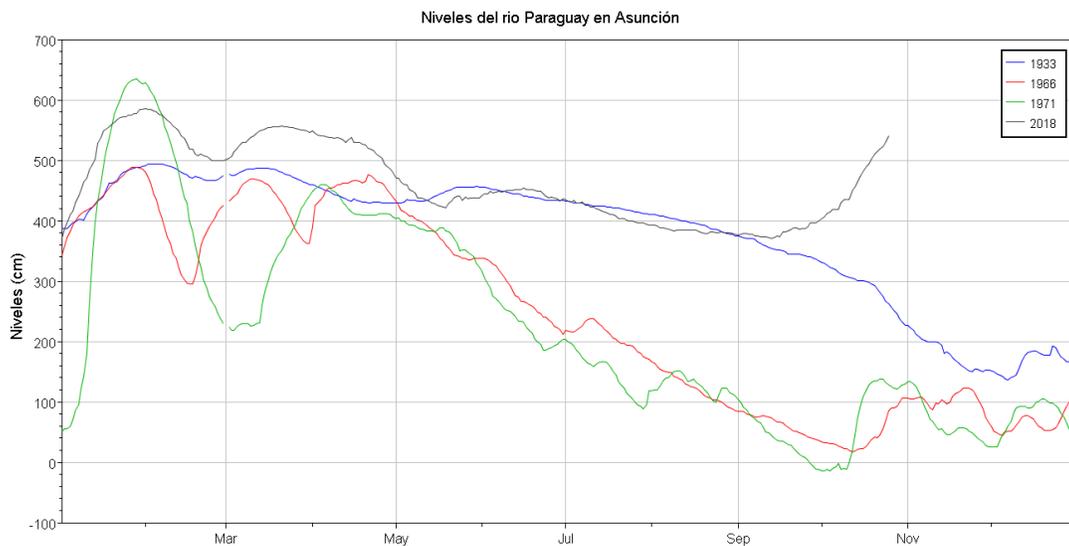


Figura 99. Año 2018 con 1933,1966 y 1971.

Se observa que 1933 es el de mejor correlación gráfica con 2018, según la figura 99. Tomando del 1 de enero al 8 de agosto (fecha en que se hizo la prueba), se realizó una regresión lineal, el resultado se observa en la tabla 29.

Tabla 29. Previsión del 9-08 al 9-09 de 2018.

fecha	real Registrado Asuncion	previsiónR	diferencia
09/08/2018	383	408.95	-25.95
10/08/2018	384	407.29	-23.29
11/08/2018	384	405.63	-21.63
12/08/2018	384	403.97	-19.97
13/08/2018	384	402.3	-18.3
14/08/2018	384	400.64	-16.64
15/08/2018	384	398.98	-14.98
16/08/2018	384	397.32	-13.32
17/08/2018	384	395.66	-11.66
18/08/2018	382	393.99	-11.99
19/08/2018	380	392.33	-12.33
20/08/2018	379	389.01	-10.01
21/08/2018	379	384.02	-5.01
22/08/2018	382	382.36	-0.36
23/08/2018	381	380.7	0.30
24/08/2018	380	379.03	0.97
25/08/2018	380	374.05	5.94
26/08/2018	381	372.39	8.61
27/08/2018	380	370.72	9.27
28/08/2018	380	369.06	10.94
29/08/2018	380	367.4	12.6
30/08/2018	379	364.08	14.92
31/08/2018	377	362.41	14.59
01/09/2018	376	360.75	15.25
02/09/2018	377	359.09	17.91
03/09/2018	379	357.43	21.57
04/09/2018	379	355.76	23.24
05/09/2018	378	355.76	22.24
06/09/2018	378	354.1	23.9
07/09/2018	374	347.45	26.55
08/09/2018	374	344.13	29.87
09/09/2018	373	339.14	33.86

22 días consecutivos, se tuvo diferencias menores a los 20cm.

Buscando disminuir el error, se probó correlacionar periodos menores a un año, como ser 3 meses, ejemplo los meses de mayo, junio y julio.

Estos fueron los años de mayor correlación positiva y sus respectivos coeficientes de correlación: 2018 con 2016= 0.8842, 2018 con 1944= 0.8683 y 2018 con 1915= 0.8376 (figura 100).

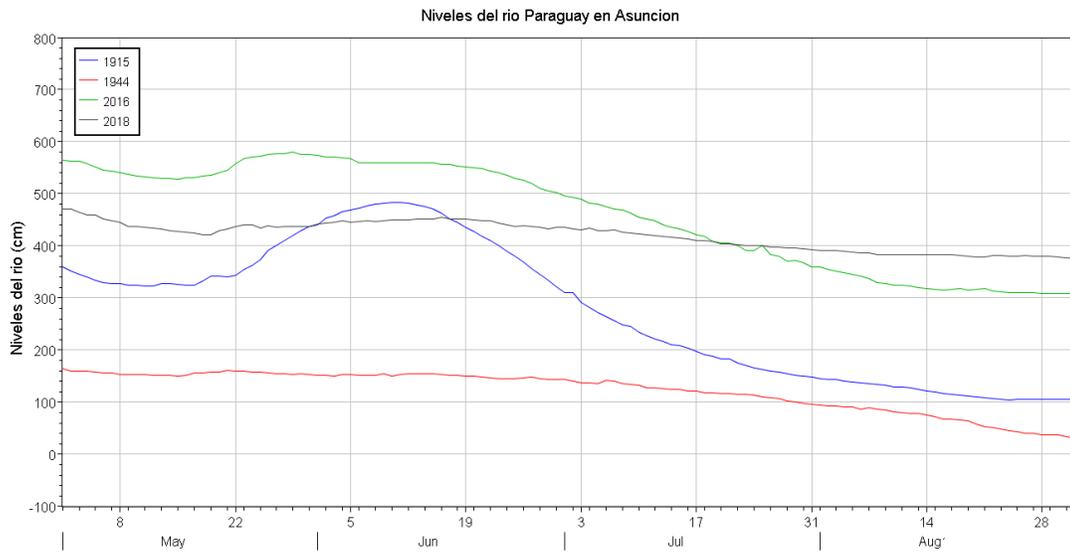


Figura 100. Años 2018 con 1915, 1944, 2016. Mayo a julio.

Según la figura, 1944 es el año de mejor correlación para el periodo mayo a julio.

Se realizaron 2 regresiones: una, del 1-05 al 31-07 de 1944 con el mismo periodo para 2018; y otra agregando 8 días más de datos, hasta el 8 de agosto. La previsión en base a esto, se muestra en la tabla 30.

**Tabla 30.** Previsión del 15-08 al 15-09 2018 con 1944.

fecha	realRegistrado	previsiónRcon1933	dif.1933	previsiónRcon1944	dif.1944
2018-08-15	384	387.32	-3.32	387.98	-3.98
2018-08-16	384	386.20	-2.20	387.98	-3.98
2018-08-17	384	385.08	-1.08	386.32	-2.32
2018-08-18	382	383.97	-1.97	384.65	-2.65
2018-08-19	380	382.85	-2.85	379.65	0.35
2018-08-20	379	380.61	-1.61	375.50	3.50
2018-08-21	379	377.26	1.74	374.67	4.33
2018-08-22	382	376.14	5.86	372.18	9.82
2018-08-23	381	375.02	5.98	369.69	11.31
2018-08-24	380	373.90	6.10	368.03	11.97
2018-08-25	380	370.55	9.45	365.55	14.45
2018-08-26	381	369.43	11.57	364.72	16.28
2018-08-27	380	368.31	11.69	363.06	16.94
2018-08-28	380	367.19	12.81	362.24	17.76
2018-08-29	380	366.08	13.92	362.24	17.76
2018-08-30	379	363.84	15.16	359.76	19.24
2018-08-31	377	362.72	14.28	357.28	19.72
2018-09-01	376	361.60	14.40	356.45	19.55
2018-09-02	377	360.48	16.52	354.80	22.20
2018-09-03	379	359.37	19.63	352.32	26.68
2018-09-04	379	358.25	20.75	350.68	28.32
2018-09-05	378	358.25	19.75	348.20	29.80
2018-09-06	378	357.13	20.87	347.38	30.62
2018-09-07	374	352.66	21.34	344.91	29.09
2018-09-08	374	350.42	23.58	343.27	30.73
2018-09-09	373	347.07	25.93	343.27	29.73
2018-09-10	373	344.83	28.17	338.33	34.67

Con 1933 se obtienen diferencias menores a 20 cm hasta los primeros 22 días, con 1944 hasta los primeros 18 días.

En la figura 101 se observa que la curva real se empieza a alejar de la pronosticada aproximadamente el 18 de agosto, considerando que empieza a subir y las curvas regresoras tienden a descender (hasta finales de setiembre en el caso de 1944, y hasta comienzos de diciembre para 1933).

14-INV-280 - Sistema De Pronóstico de Caudales y Niveles Del Rio Paraguay

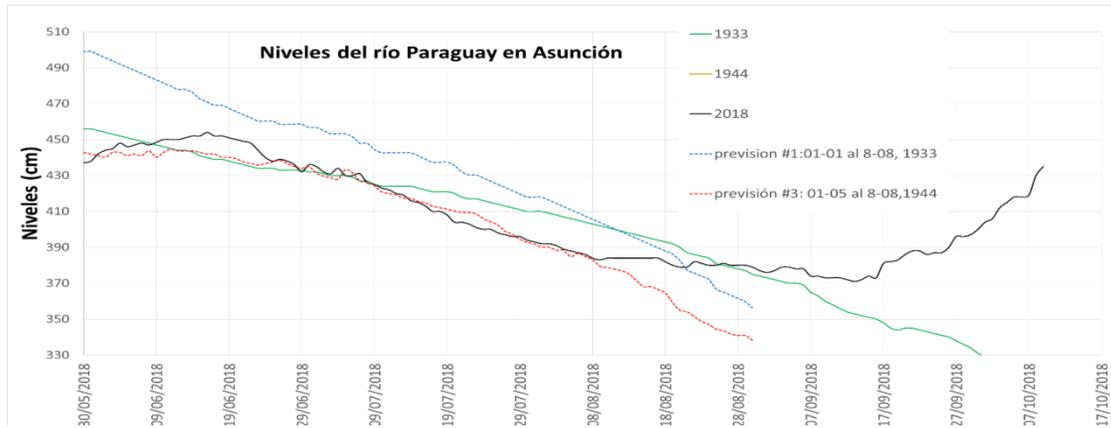


Figura 101. Replicando la serie. 2018 con 1933 y 1944.

En resumen, para el periodo comprendido desde el 1 de mayo al 8 de agosto, 1944 vs 2018 se tiene que:

- Coeficiente de determinación  $R^2 = 0.8604$
- Coeficiente de Correlación de Pearson  $R = 0.9274$
- La ecuación lineal dada por el gráfico de dispersión (1944 vs 2018 en el periodo 1-05 a 8-08) que se muestra en la figura 102 da mejores resultados que la polinómica de 2do grado.

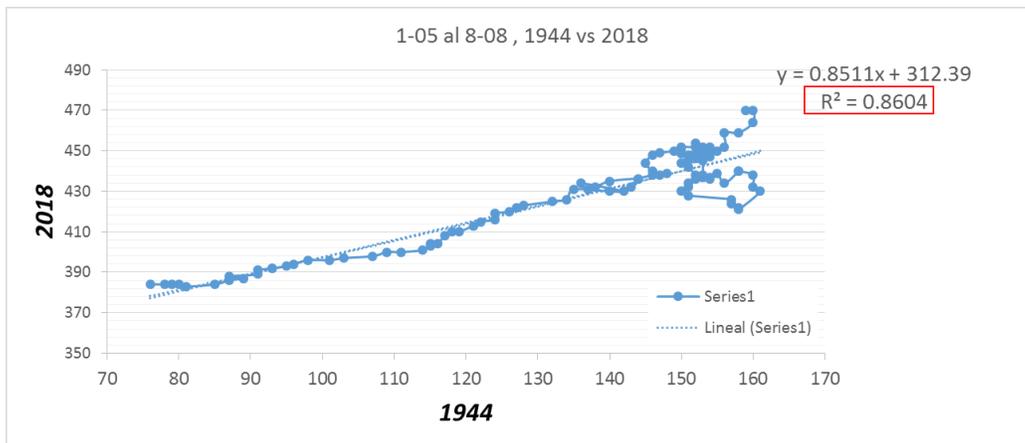


Figura 102. Ecuación lineal 2018 con 1944.

### 3.3.4. Caso D

Se utilizaron modelos ARIMA<sup>1</sup> y primeramente, se realizó un análisis de estacionariedad para luego determinar los órdenes p y q del modelo.

Los coeficientes de autocorrelación del correlograma decrecen exponencialmente. Observando la función de autocorrelación parcial (pacf) se identificó 1 lag significativo, y se tomó por lo tanto como un modelo autorregresivo de orden 1, AR(1). Observando la función de autocorrelación (fac) se identificaron 2 lags significativos, por lo que se decidió por un modelo de medias móviles de orden 2, MA (2).

Usando R, un software libre para estadística, se obtuvieron los parámetros para el modelo ARIMA(1,1,2), para luego hacer las previsiones.

Con el periodo de 01-01-1904 a agosto 2018 se hizo la previsión hasta setiembre de 2018 (tablas 31 Y 32).

La sugerencia del software, con la función auto.arima es un modelo ARIMA(4,1,3) con los siguiente coeficientes:

**Tabla 31.** Coeficientes utilizados en el modelo ARIMA.

ar1	ar2	ar3	ar4	ma1	ma2	ma3
<b>0.989</b>	0.5	-0.5996	0.0585	-0.4583	-0.5747	0.3045

<sup>1</sup> En [estadística series temporales](#), un **modelo autorregresivo integrado de promedio móvil** o **ARIMA** (acrónimo del inglés *autoregressive integrated moving average*) es un [modelo estadístico](#) que utiliza variaciones y regresiones de datos estadísticos con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro. Se trata de un modelo dinámico de series temporales, es decir, las estimaciones futuras vienen explicadas por los datos del pasado y no por [variables independientes](#).

Fue desarrollado a finales de los sesenta del siglo XX. Box y Jenkins ([1976](#)).

**Tabla 32.** Previsión agosto 2018. ARIMA.

	fecha	niv.registrado	forecastR.ARIMA.4.1.3	diferencia	forecastR.ARIMA.1.1.1	diferencia.1
1	2018-08-01	392	392.12	-0.12	392.06	-0.06
2	2018-08-02	392	391.33	0.67	391.22	0.78
3	2018-08-03	391	390.64	0.36	390.48	0.52
4	2018-08-04	389	390.03	-1.03	389.83	-0.83
5	2018-08-05	388	389.51	-1.51	389.25	-1.25
6	2018-08-06	387	389.05	-2.05	388.74	-1.74
7	2018-08-07	386	388.66	-2.66	388.28	-2.28
8	2018-08-08	384	388.33	-4.33	387.88	-3.88
9	2018-08-09	383	388.05	-5.05	387.53	-4.53
10	2018-08-10	384	387.82	-3.82	387.21	-3.21
11	2018-08-11	384	387.62	-3.62	386.93	-2.93
12	2018-08-12	384	387.45	-3.45	386.69	-2.69
13	2018-08-13	384	387.32	-3.32	386.47	-2.47
14	2018-08-14	384	387.20	-3.20	386.28	-2.28
15	2018-08-15	384	387.11	-3.11	386.11	-2.11
16	2018-08-16	384	387.03	-3.03	385.96	-1.96
17	2018-08-17	384	386.97	-2.97	385.82	-1.82
18	2018-08-18	382	386.92	-4.92	385.70	-3.70
19	2018-08-19	380	386.88	-6.88	385.60	-5.60
20	2018-08-20	379	386.85	-7.85	385.51	-6.51
21	2018-08-21	379	386.82	-7.82	385.42	-6.42
22	2018-08-22	382	386.80	-4.80	385.35	-3.35
23	2018-08-23	381	386.79	-5.79	385.29	-4.29
24	2018-08-24	380	386.78	-6.78	385.23	-5.23
25	2018-08-25	380	386.77	-6.77	385.18	-5.18
26	2018-08-26	381	386.76	-5.76	385.14	-4.14
27	2018-08-27	380	386.75	-6.75	385.10	-5.10

**Tabla 33.** Previsión setiembre 2018. ARIMA.

fecha	niv.registrado	forecastR.ARIMA.4.1.3	diferencia	forecastR.ARIMA.1.1.1	diferencia.1
32 2018-09-01	376	386.74	-10.74	384.96	-8.96
33 2018-09-02	377	386.74	-9.74	384.94	-7.94
34 2018-09-03	379	386.74	-7.74	384.92	-5.92
35 2018-09-04	379	386.74	-7.74	384.91	-5.91
36 2018-09-05	378	386.74	-8.74	384.89	-6.89
37 2018-09-06	378	386.74	-8.74	384.88	-6.88
38 2018-09-07	374	386.74	-12.74	384.87	-10.87
39 2018-09-08	374	386.74	-12.74	384.86	-10.86
40 2018-09-09	373	386.74	-13.74	384.86	-11.86
41 2018-09-10	373	386.74	-13.74	384.85	-11.85
42 2018-09-11	373	386.74	-13.74	384.84	-11.84
43 2018-09-12	372	386.74	-14.74	384.84	-12.84
44 2018-09-13	371	386.74	-15.74	384.83	-13.83
45 2018-09-14	372	386.74	-14.74	384.83	-12.83
46 2018-09-15	374	386.74	-12.74	384.82	-10.82
47 2018-09-16	373	386.74	-13.74	384.82	-11.82
48 2018-09-17	381	386.74	-5.74	384.82	-3.82
49 2018-09-18	382	386.75	-4.75	384.81	-2.81
50 2018-09-19	383	386.75	-3.75	384.81	-1.81
51 2018-09-20	386	386.75	-0.75	384.81	1.19
52 2018-09-21	388	386.75	1.25	384.81	3.19
53 2018-09-22	388	386.75	1.25	384.81	3.19
54 2018-09-23	386	386.75	-0.75	384.81	1.19
55 2018-09-24	387	386.75	0.25	384.80	2.20
56 2018-09-25	387	386.75	0.25	384.80	2.20
57 2018-09-26	390	386.75	3.25	384.80	5.20
58 2018-09-27	396	386.75	9.25	384.80	11.20

Si bien los valores de la previsión no detectaron la tendencia, se tienen resultados para 2 meses con diferencias menores a 20 cm.

El análisis se realizó también en diferentes años. Los resultados del caso se observan en la tabla 34, para cada año analizado.

**Tabla 34.** Resumen de resultados, Caso D.

Previsión	Días con diferencias menores o iguales a 20 cm.	periodo de regresión	modelo ARIMA sugerido por
ago-18	mes completo		mediante el correlograma
			R
sep-18	mes completo	01-01-1904 a agosto 2018	mediante el correlograma
			R
dic-11	9	01-01-1904 a 30-11-2011.	R
	7 seguidos (<21 cm)		mediante el correlograma
	23	01-01-2011 a 30-11-2011.	R

	8 seguidos		mediante el correlograma
nov-15	11	01-01-1904 a 31-10-2015	R
	6	01-01-2015 a 31-10-2015	R
	11	01-01-1904 a 31-10-2015	mediante el correlograma
jul-17	5	01-01-1904 a 30-06-2017.	R
	mes completo		mediante el correlograma

## 4. Conclusiones y recomendaciones

En el presente apartado, se detallan las conclusiones principales de los tres productos principales, cuyo desarrollo fue explicado anteriormente, y finalmente, en base a éstos, se presentan las conclusiones finales del proyecto, y recomendaciones para la continuación del trabajo.

### 4.1. Sistema de pronóstico de niveles del río Paraguay

#### 4.1.1. Modelos Hidrológicos

Conforme se observaron, se alcanzaron resultados, en general, aceptables. Se obtuvieron resultados muy buenos en la cuenca del río Apa, con valores altos del coeficiente R<sup>2</sup>, a pesar de la escasez de datos de precipitación. La calibración en las cuencas de los ríos Ypané y Manduvirá se consideraron buenos en el periodo de calibración, sin embargo, el ajuste no fue óptimo en las cuencas de los ríos Aquidabán y Manduvirá, pero, para los fines de esta componente del proyecto, se consideran suficientes.

Ante la ausencia de datos de caudal observado en la mayoría de las cuencas, se recurrió al método de Área-Pendiente para la generación de caudales sintéticos, con los cuales se ajustaron los modelos. Éstos no comprenden datos reales, por lo que se manejan teniendo en cuenta sus limitaciones, asimismo, esto hizo que la calibración consista en un ajuste aproximado a estos valores, manteniendo los resultados en un rango de valores aceptables. Es importante destacar la utilidad de este método para situaciones como las que se presentaron en este estudio.

Los hidrogramas se utilizaron como aporte lateral en el modelo hidráulico, y se evaluaron a la par de los resultados de este, de manera a identificar y enmendar errores. Por otro lado, se pudo estimar el nivel de influencia que tienen las cuencas estudiadas en el caudal del río Paraguay que llega a Asunción, según los resultados de las modelaciones, teniendo que, de todo el caudal de entrada a Asunción, aproximadamente el 21% de éste representa el aporte de las cuencas de los ríos Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá. El aporte de cada una de estas cuencas en base a ese porcentaje se observa en la tabla 35

Tabla 35. Aporte de caudal de las cuencas de estudio.

	Apa	Aquidabán	Ypané	Jejuí	Manduvirá
Aporte (%)	23.73	12.92	12.19	29.70	21.46

También es indispensable aumentar la densidad de las estaciones de monitoreo. La cantidad de estaciones pluviométricas para cada cuenca se encuentran muy por debajo de lo recomendado, limitando considerablemente los resultados. De igual forma, no se contaron con datos de caudal observado en las cuencas; a excepción de la del río Apa, siendo lo óptimo realizar la calibración con datos reales y en periodos más recientes.

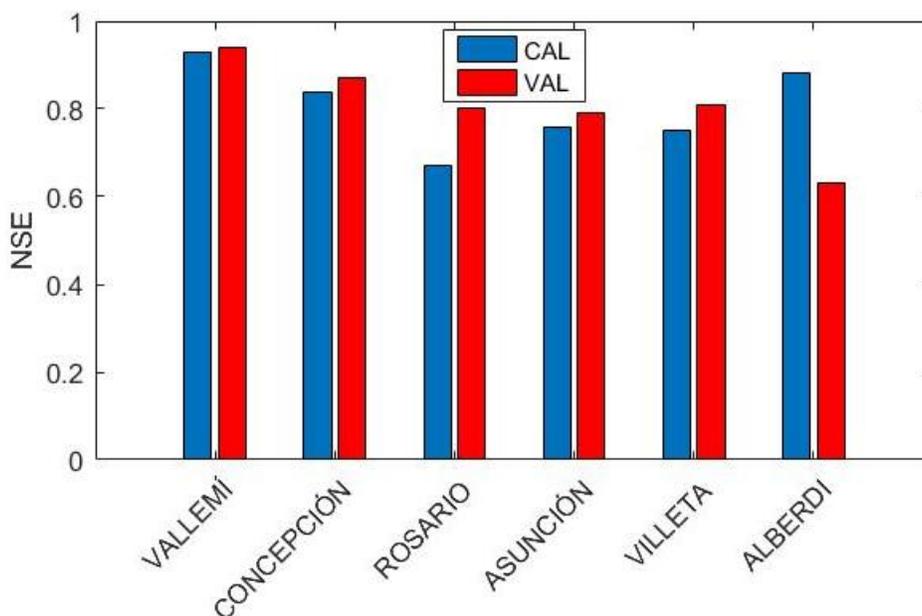
En trabajos posteriores, sería necesario evaluar los modelos utilizando métodos diferentes y realizando una mayor discretización en las cuencas, como lo realizado en la tesis “Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay (Aseretto, 2018)”, como un sub producto de la Investigación.

Por último, es necesario destacar que, con las limitaciones encontradas, se generaron modelos hidrológicos para cinco cuencas de gran importancia en la Región Oriental, los cuales constituyen un importante aporte del proyecto, facilitando la posibilidad de mejorarlos ante mayor cantidad y calidad de datos, en aplicaciones futuras.

#### 4.1.2. Modelo Hidrodinámico

En términos generales, el Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay representa correctamente el comportamiento hidráulico en la mayoría de las estaciones hidrométricas. En el periodo de calibración se obtuvieron buenos resultados en todas las estaciones hidrométricas, sin embargo, en el periodo de validación se observan resultados poco representativos en la estación de Alberdi.

Considerando que el objetivo del presente trabajo es utilizar el Modelo Hidrodinámico para la previsión de niveles en Asunción, se considera que los resultados son satisfactorios. Se mostró claramente que el modelo tiene capacidad predictiva en la estación Asunción, teniendo en cuenta el desempeño semejante en el periodo de calibración y validación, donde NSE se mantuvo entre 0.76 y 0.79, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 103.



**Figura 103.** Comparativo Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe para periodo de Calibración y Validación.

Los resultados obtenidos pueden ser considerablemente mejorados si se incorpora al modelo mayor información batimétrica del cauce del río Paraguay, lo cual reduciría considerablemente incertidumbres asociadas a la variabilidad de la pendiente y sección del cauce del río a lo largo del tramo de estudio. En la Figura 104 se muestran los tramos donde se recomienda realizar campañas de batimetría.

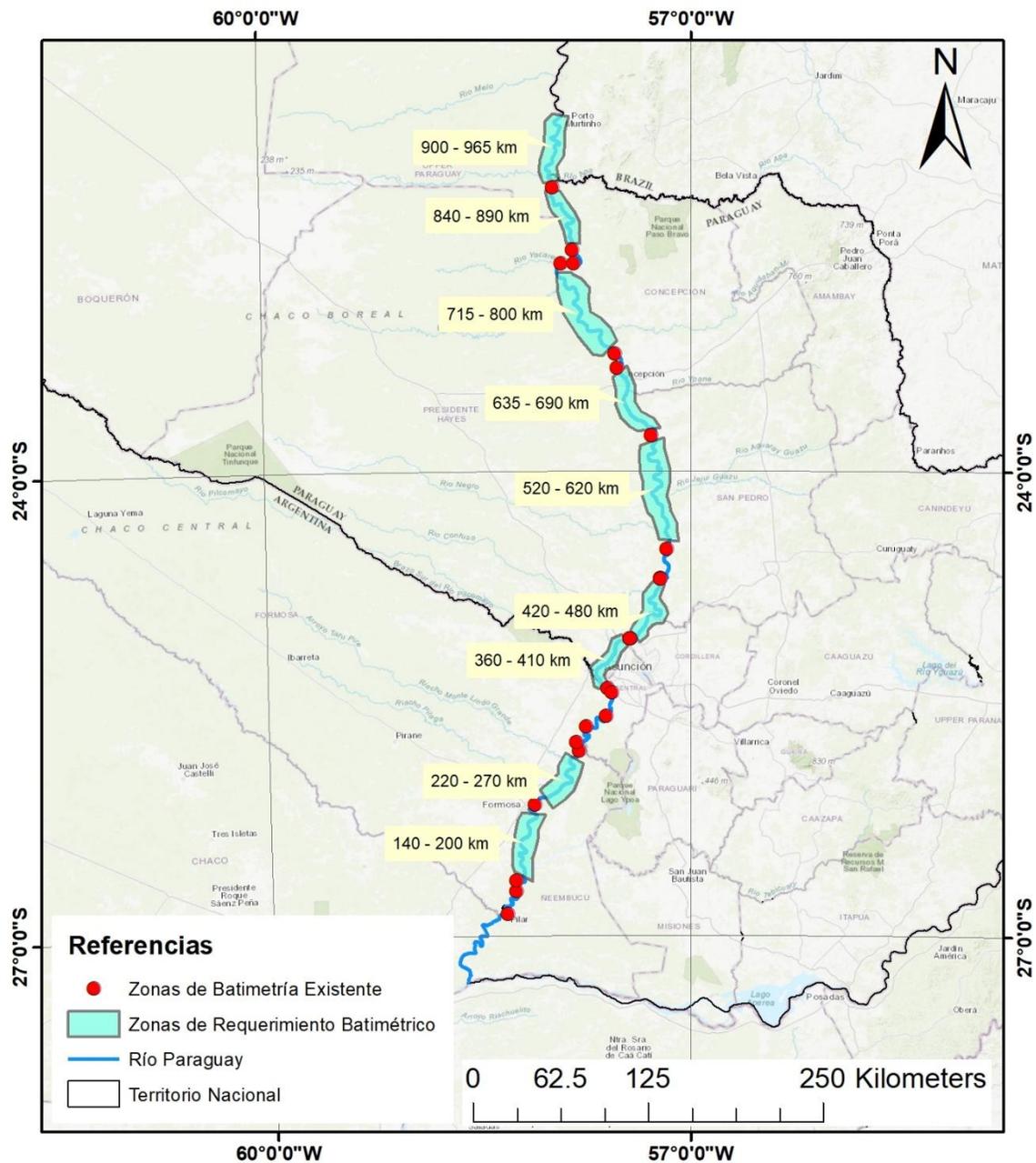


Figura 104. Zonas recomendadas para realizar campañas de batimetría, progresivas referenciadas al cero del Río Paraguay en confluencia.

Respecto a las planicies de inundación, si bien el MERIT SRTM es un producto mejorado, se podría considerar realizar campañas de relevamiento LiDAR y/o Aerofotogrametría que permita generar topografías más representativas de las planicies de inundación del río.

Finalmente, se considera de suma importancia monitorear los niveles y aportes de los ríos afluentes, de tal manera a calibrar los modelos hidrológicos en base a datos diarios medidos.

#### 4.1.3. Operacionalización del sistema sobre plataforma WEB del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH)

Como fue detallado en punto 3.2, los modelos ya se encuentran operando dentro del ambiente tecnológico del CIH, sin embargo, sus resultados están sujetos a la capacidad de los modelos, por lo que, las recomendaciones dadas en los apartados anteriores deben ser llevadas en cuenta para que el sistema completo (modelos + operación) sea óptimo.

De igual forma, este conjunto constituye una herramienta de gran importancia al país, la cual, está al alcance de todas las personas, y cuya operación, mantenimiento y optimización, deben ser temas a desarrollar en el futuro acorde a esto, atendiendo que la Universidad no es una institución operativa, pero puede apoyar a la instalación en la DMH DINAC, junto al CIH de Itaipu.

#### 4.2. Previsión de niveles del río Paraguay en Asunción mediante modelación estocástica

Se logró recopilar los datos de nivel y precipitación del río Paraguay para las 4 estaciones del alcance. Del año 2000 a agosto del año 2018 se realizó el análisis de calidad de datos de niveles. Se encontró diferencias entre las fuentes, de allí la recomendación a las entidades gubernamentales responsables, de hacer un control de calidad mensual o trimestral para ir eliminando posibles errores.

Con los datos de precipitación recopilados y con los de niveles recopilados y validados se organizó una base de datos.

Se analizaron las propiedades del proceso estocástico y las propiedades estadísticas de la serie temporal de niveles históricos del río Paraguay en Asunción. Esto ayudó a que sea posible construir modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción. Se presentaron modelos de regresión lineal con diferentes entradas y modelos ARIMA univariante. La regresión lineal se está usando actualmente atendiendo la influencia de los fenómenos “La Niña” y “El Niño” para la época de previsión. Se buscó contribuir a la mejora de estos resultados con las entradas y nuevos métodos.

Respecto a la validación de los métodos, las previsiones se hicieron para el año 2018, y para la validación se tomó años al azar: años influenciados por el fenómeno “La Niña” y años influenciados por el fenómeno “El Niño”, años de aguas altas y bajas y años “anormales”, estos procesos se detallan en el anexo correspondiente. Si bien no se tiene aún listo para automatizar el proceso, se encontró información importante, a medida que se iban teniendo en cuenta las consideraciones para elegir cada entrada. Esta es una actividad que se podría desarrollar posteriormente con apoyo del CIH y la DMH

Entre los modelos de regresión lineal, las entradas que se probaron fueron: años influenciados por los fenómenos “La Niña” y “El Niño”, correlaciones con Concepción y con otros años o trimestres con curvas de comportamiento similar al periodo de previsión, para meses antes. En general, para meses del segundo cuatrimestre del año (se probó para mayo, agosto y julio de diferentes años), la entrada para la regresión lineal que da mejor resultado es la de correlación trimestral, con un horizonte de previsión mínimo de 13 días (de entre los casos analizados).

Con años niña/o el inconveniente que se encontró es que si el año de previsión sigue un comportamiento atípico (no la forma campana de promedios históricos) podría producir más error o disminuir el horizonte de previsión con diferencias menores a 20 cm.

La correlación con Concepción fue la que menos resultados favorables mostró.

El modelo ARIMA que se presentó es univariante. La entrada que se consideró para este método fue solo niveles reales registrados de Asunción. Para meses como julio, agosto y setiembre presentó un horizonte incluso mayor al mes, y para los meses para los cuales los otros modelos presentaron dificultades, por ejemplo, el de entrada Niña/o, tales como diciembre 2011 y noviembre 2015 por ejemplo, mostró muy buenos resultados, con previsiones con diferencias menores a los 20 cm para más de 10 días.

Una hipótesis del por qué los modelos podrían estar teniendo mayor dificultad de previsión en el último trimestre del año es que podría deberse al efecto de la precipitación en estos meses, considerando que son los meses de más precipitación en el año.

En base a las previsiones de octubre y noviembre de 2018, incorporando la precipitación para los ajustes de los modelos a modo de prueba solamente, considerando que no era éste un objetivo del trabajo, presento como recomendación para posteriores investigaciones con estos u otros modelos incluir la precipitación como entrada para los modelos.

Para incluir el escenario de precipitación al modelo, primeramente se tendría que definir el umbral de precipitación considerado relevante para afectar significativamente al comportamiento de niveles.

### 4.3. Consideraciones finales

Los resultados obtenidos presentan perspectivas muy favorables para el fortalecimiento del sector de Hidrología Operativa a nivel nacional y en particular en el río Paraguay. Es importante tener presente que el río Paraná cuenta con sistemas de pronósticos hidrológicos a partir de las Centrales Hidroeléctricas Itaipu y Yacyreta.

En el caso del río Paraguay se cuenta con la Dirección de Meteorología e Hidrología, dependiente actualmente de la DINAC, como ente operativo para monitorear el río Paraguay y su cuenca.

Como el país requiere mejorar los sistemas de pronósticos hidrológicos, se espera que los resultados de esta investigación puedan servir de base para la instalación efectiva en la DMH de un sistema de pronóstico hidrológico, para el cual la Universidad Católica de Asunción pone a disposición las plataformas de modelación desarrolladas.

Es importante tener presente que es necesario aumentar la red de estaciones hidrometeorológicas en toda la región de análisis y contar con mayor información de relevamientos topo batimétricos del cauce del río Paraguay, para lo cual es importante coordinar acciones con la entidad que administra la Hidrovía Paraguay en tramo paraguayo.

Las 2 estaciones automáticas instaladas y que se presenta en el Anexo se pondrá a disposición de la DMH para su difusión en el portal web y su mantenimiento operativo a futuro.

Todos los resultados de la presente investigación, la Universidad Católica pone a disposición pública a través de un portal web desarrollado al efecto y cuyos detalles se presentan en el Anexo.

Equipo de Investigación 14-INV-280

## 5. Bibliografía

- Aparicio, F.J. "Fundamentos de Hidrología de Superficie – 1ra Edición". México, Editorial LIMUSA, 1992. ISBN 968-18-3014-8.
- Aseretto, R. (2018). Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay. Tesis de Grado de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Asunción - Paraguay.
- Brunner, G. (2008). Calibration of Unsteady Flow Models. NOAA.
- Castellarin, Baldassarre, Bates, & Brath. (2009). Optimal Cross-Sectional Spacing in Preissmann Scheme 1D Hydrodynamic Models. Journal of Hydraulic Engineering.
- Convenio Itaipú - Fundación Parque Tecnológico Itaipú. (2013). " Atlas del Potencial Hidroenergético del Paraguay". 146 p.
- Cowan. (1956). Estimating Hydraulic Roughness Coefficients. Agricultural Engineering, 473-475.
- Chávez, S.; Meyer, C.; Santos, S. (2006). "División Administrativa y Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de la República del Paraguay a partir de las Cuencas Hidrográficas". Tesis de Grado de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción.
- Chow, V. (1964). "Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology, Volumen 1". McGraw-Gill.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. McGRAW-HILL.
- Echeverria, C.; Bravo, J.; Collischonn, W. (2011). "Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH na bacia transfronteiriça do rio Apa". XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Fan, F., Pontes, P., Paiva, R., & Collischonn, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 137-147.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., . . . Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Rev. Geophys.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). "Diseño Hidrológico". Edición digital publicada en la biblioteca virtual de la WASA-GN. ISBN:978-987-05-2738-2.
- Gaete Vergara, L.; Espinosa, F. (2001). "Manual de Diseño de Sistemas de Riego Tecnificado". Universidad de Talca, Chile.
- Gottschalk, L.; Motovilov, Y. (2000). "Macro-scale hydrological modelling - scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World'. Japan Society of Hydrology and Water Resources, Tokyo.
- HEC. (2016). HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual. Davis, California: U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.

HEC. (2016). HEC-RAS River Analysis System - User's Manual. Davis, California: U.S. Army Corps of Engineers - Institute of Water Resources - Hydrologic Engineering Center.

Instituto Nacional del Agua - Argentina. (2013). Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción frente a Emergencias). Ezeiza: Instituto Nacional del Agua.

López, O.; González, E.; Llamas, P.; Molinas, A.; Franco, E.; García, S.; Ríos, E. (1995). "Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra". MAG.

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling. Zürich - Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.

Nash & Sutcliffe. (1970). "River Flow Forecasting Through Conceptual Models". Journal of Hydrology, 282-290.

Pereira, B. (2015). Implementación del Modelo Hidrológico HEC-HMS en la Cuenca del Río Carapa. Tesis de Grado de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Asunción - Paraguay.

Refsgaard, & Knudsen. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological. Water Resources Research, 2189-2202.

Sánchez, F.J. (2012). "Manual Elemental (HEC-HMS)". Departamento de Geología – Universidad de Salamanca, España.

Toñáñez, J. (2014). "Relatorio de Impacto Ambiental del Proyecto Cultivo de Arroz – Cría de Ganado Vacuno: Establecimiento Vanguardia S.A.".

U. S. Army Corps of Engineers (2010). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual". Version 3.5.

Vélez, J. J., M. Puricelli<sup>1</sup>, et al. (2009). "Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework." Hydrology and Earth System Sciences 13: 229-246.

Viessman, W. J. & Lewis, G. L. (2003) 5ta. Edición. "Introduction to Hydrology".

Yamazaki, D., Ikeshima, Tawatari, Yamaguchi, O'Loughlin, Neal, . . . Bates. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. Geophysical Research Letters.

## 6. Anexos: reporte de las actividades desarrolladas, como medios de verificación

- 6.1. Anexo A: Tesis de Grado “Evaluación de modelos estocásticos para la previsión de niveles hidrométricos del río Paraguay en Asunción” – Olga Orihuela et. al. (2018)
- 6.2. Anexo B: Tesis de Grado “Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”, Rosa Aseretto et al. (2018)
- 6.3. Anexo C: Participación del equipo de trabajo en el XXIII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguacu – Brasil. Año 2019
- 6.4. Anexo D: Informes de instalación de reglas hidrométricas automáticas
- 6.5. Anexo E: Participación en Taller “Cambio Global y Riesgos Climáticos Biodiversidad, Agricultura, Salud, Recursos Hídricos en la Cuenca del Paraguay”. Año 2017
- 6.6. Anexo F: Informe del Taller Nacional de Mediciones Hidrológicas. Año 2018
- 6.7. Anexo G: Memoria de cooperación técnica CIH – UCA. Año 2018
- 6.8. Anexo H: Informe de medición de caudales río Paraguay y capacitación. Año 2018
- 6.9. Anexo I: Portal web del proyecto