



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



POTENCIAL HIDROELECTRICO DE LA PROVINCIA DE MISIONES

Primer Informe Parcial



Aprovechamiento Salto Taruma, San Vicente, Misiones



Proyecto LHA 358
Informe LHA 01-358-15
Ezeiza, Noviembre de 2015

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Emilio LECERTUA

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Lucas Storto

Ing. Matthias FISCHER (CEED)

Fátima Schoninger (CEED)

POTENCIAL HIDROELECTRICO DE LA PROVINCIA DE MISIONES

Primer Informe Parcial

RESUMEN

Se presenta la información recopilada para ser utilizada en la modelación hidrológica para todas la cuencas de la Provincia de Misiones. Se describe la implementación de la modelación hidrológica. Se presentan resultados preliminares del modelo hidrológico para la cuenca del Piray Guazú. Se describe la metodología de evaluación del Potencial Hidroeléctrico Teórico y se la aplica a la cuenca del Piray Guazú.

Descriptores temáticos: Análisis de datos, modelación hidrológica, potencial hidroeléctrico teórico

Descriptores geográficos: Provincia de Misiones, Argentina

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	BASE DE DATOS	6
2.1	DATOS TOPOGRAFICOS	6
2.1.1	Curvas de Nivel	6
2.1.2	Secciones Transversales	6
2.1.3	Modelo Digital de Elevación	10
2.2	DATOS HIDROLÓGICOS	12
2.2.1	Red hidrográfica	12
2.2.2	Cuencas	14
2.2.3	Clima	16
2.2.4	Precipitaciones	17
2.2.5	Temperatura	26
2.2.6	Heliofanía	27
2.2.7	Viento	27
2.2.8	Humedad Relativa	30
2.2.9	Evapotranspiración	31
2.2.10	Hidrometría	32
2.3	SUELO	39
2.3.1	Usos del suelo	39
2.3.2	Tipos de suelo	43
2.3.3	Erosibilidad	43
2.4	APROVECHAMIENTOS EXISTENTES Y PROYECTADOS	46

3	MODELO HIDROLOGICO	49
3.1	Metodología	49
3.2	Preprocesamiento hidrológico	49
3.2.1	Selección del MDE del terreno	50
3.2.2	Relleno de Vacíos	50
3.2.3	Dirección del flujo	52
3.2.4	Acumulación del flujo	53
3.2.5	Definición de cauces	53
3.2.6	Segmentación de cauces	54
3.2.7	Delineación de cuencas	54
3.3	Esquematización	55
3.3.1	Cuencas	55
3.3.2	Modelo de balance vertical	58
3.4	Parámetros de la modelación hidrológica	60
3.4.1	Almacenamiento máximo	60
3.4.2	Infiltración máxima y percolaciones	62
3.4.3	Flujo de base	63
3.4.4	Escorrentía superficial	63
3.4.5	Evapotranspiración	64
3.5	Calibración	66
4	CÁLCULO DE POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO	70
4.1	Metodología	70
4.2	Aplicación	71
5	CONCLUSIONES	74

1 INTRODUCCIÓN

La Provincia de Misiones presenta excedentes hídricos de significación, que pueden explotarse para producir hidroelectricidad. El objetivo del presente estudio es evaluar el Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto de todas las cuencas de la Provincia de Misiones, de modo de proveer las bases para el establecimiento de mini o microcentrales adaptadas a cada cuenca.

Los resultados de esta etapa de estudios permitirán identificar los emprendimientos potencialmente más interesantes. En una segunda etapa de estudios podría encararse el cálculo del Potencial Hidroeléctrico Técnico Aprovechable de los emprendimientos seleccionados.

El estudio comprende las siguientes tareas:

1. Identificación de las cuencas hidrográficas de la Provincia de Misiones y representación en un Sistema de Información Geográfica (GIS).
2. Construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno en base a datos del IGN y satelitales.
3. Construcción de la base de datos climáticos en base a registros disponibles en estaciones terrestres e información satelital.
4. Recopilación de información hidrométrica disponible sobre los cursos de agua (niveles, aforos).
5. Implementación de modelos hidrológicos continuos en el tiempo para cada una de las cuencas hidrográficas en base al software HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de EEUU.
6. Construcción de curvas de frecuencia mensuales de caudal para cada cuenca, en base a los resultados de los modelos, y para distintos puntos de cierre.
7. Cálculo del Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto para cada cuenca, para distintos puntos de cierre.

El contenido de este Primer Informe Parcial es el siguiente:

- En el capítulo 2 se presentan los datos recopilados que se utilizarán para la modelación hidrológica.
- En el capítulo 3 se describe la implementación del modelo hidrológico, y se presentan los resultados preliminares para la cuenca del Piray Guazú.
- En el capítulo 4 presenta la metodología para el cálculo del Potencial Hidroeléctrico Teórico, y se la aplica a la cuenca del Piray Guazú.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones de esta fase del estudio.

2 BASE DE DATOS

2.1 DATOS TOPOGRAFICOS

A continuación se indican los tipos de datos topográficos disponibles, y los utilizados para construir el Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno.

2.1.1 *Curvas de Nivel*

Se contó con curvas de nivel cada 25m, descargadas del sitio oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN)¹. Las cotas de dichas curvas están referidas al cero IGN, y se encuentran georreferenciadas en el sistema UTM21S. En la Figura 2.1.1 se presentan esas curvas de nivel para toda la Provincia de Misiones. Se observa que la densidad de curvas de nivel es menor al sureste de la provincia, indicando que se trata de una zona más llana, por lo que la resolución de 25m resulta en una representación topográfica relativamente pobre para esa zona.

2.1.2 *Secciones Transversales*

Se dispuso de datos de relevamiento de algunas secciones transversales aisladas correspondientes a cuatro arroyos, provistas por EVARSA, las cuales se representan en la Figura 2.1.2, donde también se indica su ubicación.

¹ Curvas de nivel IGN, Agosto 2015 (http://www.ign.gob.ar/archivos/sig250/CURVAS_DE_NIVEL.zip)

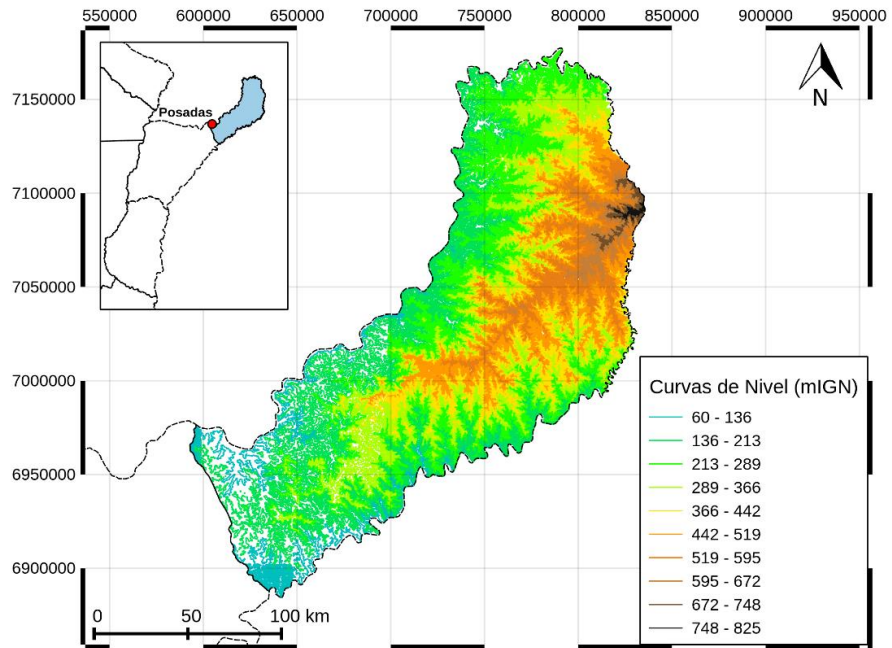
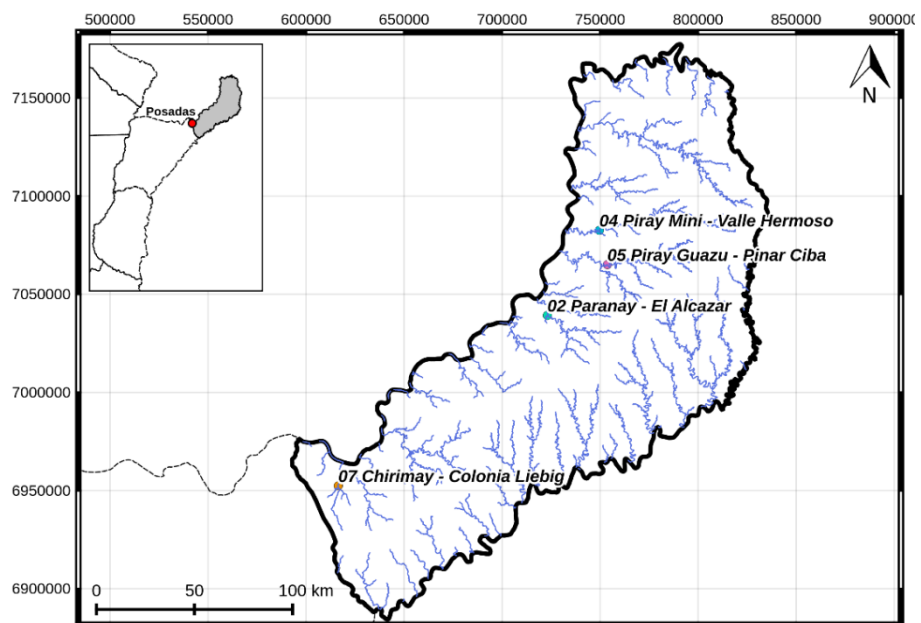
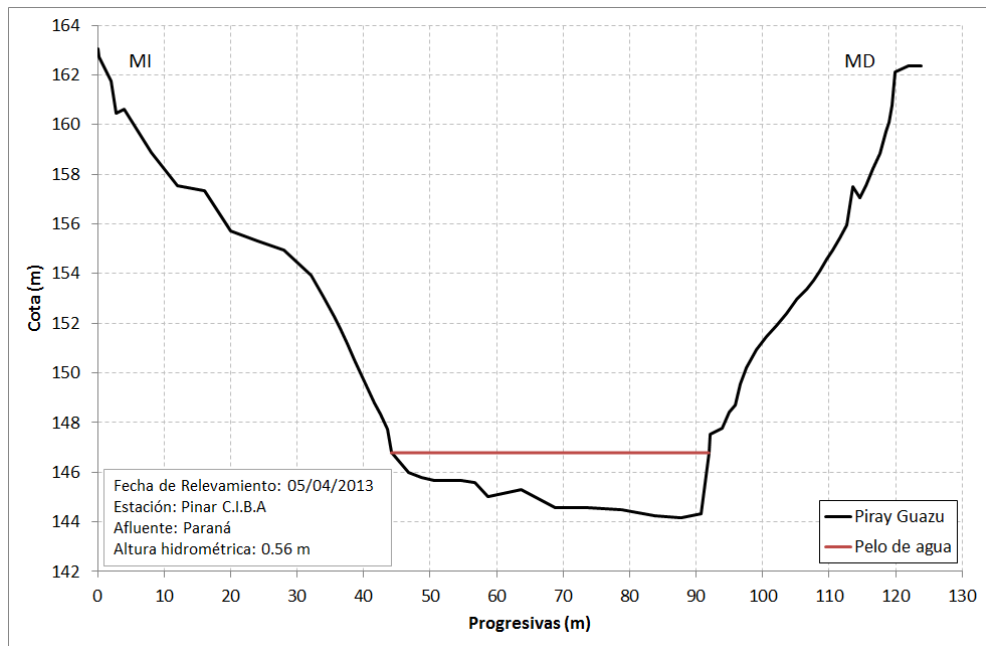


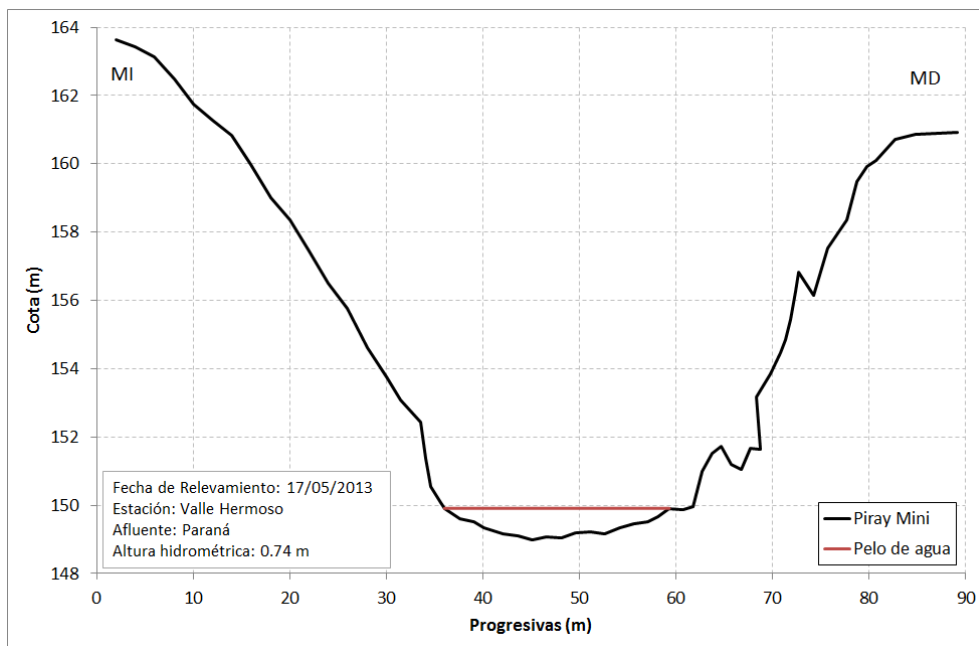
Figura 2.1.1 Curvas de Nivel IGN (cada 25m)



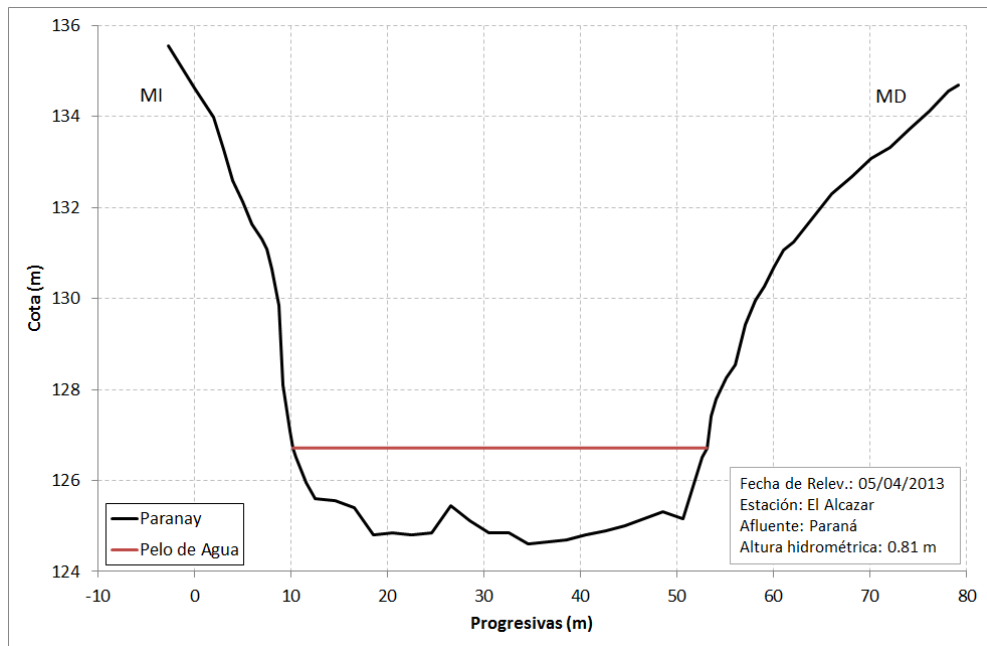
a) Ubicación de secciones



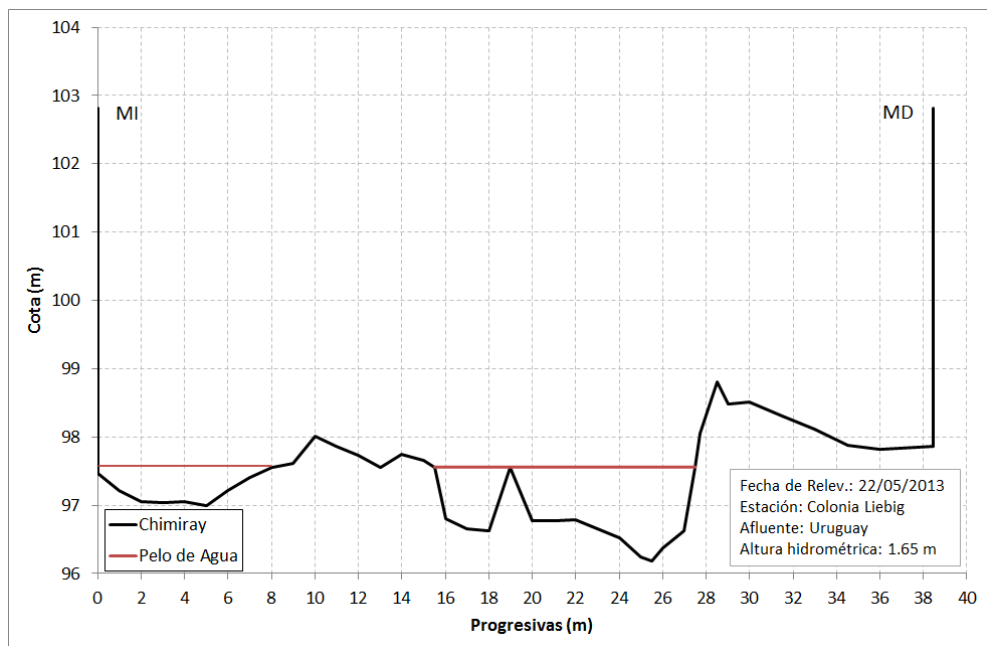
b) Piray Guazu (05)



c) Piray Mini (04)



d) Paranay (02)



e) Chimiray (07)

Figura 2.1.2 Secciones transversales de arroyos

2.1.3 Modelo Digital de Elevación

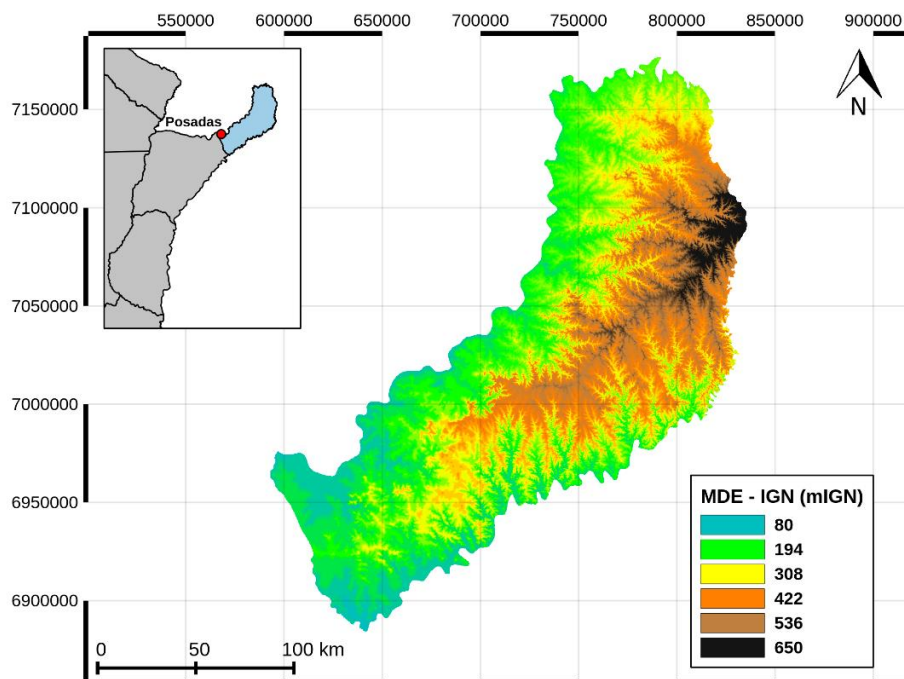
Para la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno se dispuso de tres fuentes, a saber:

- Curvas de nivel del IGN, ya mostradas en la sección 2.1.1.
- MDE de la misión SRTM procesado por el IGN².
- MDE de la misión SRTM de la NASA³.

En la Figura 2.1.3a se muestra el MDE elaborado a partir de la interpolación de las curvas de nivel IGN (MDE IGN).

La Figura 2.1.3b presenta el MDE del SRTM procesado por IGN (SRTM-AR). El paso espacial es de 45m. Según consta en la documentación del IGN, tiene un procesamiento de relleno de vacíos, filtrado espacial, enmascarado de límites e inclusión de datos de lagos. Respecto de la red de puntos fijos del IGN (138 puntos en la Provincia de Misiones), el desvío estándar es de +2.83m.

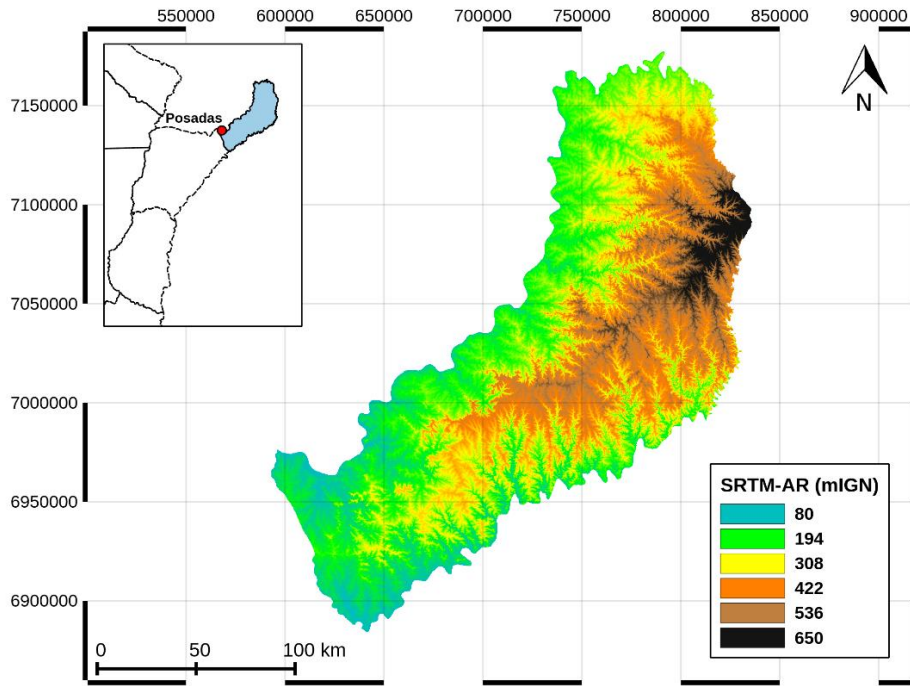
Por último, en la Figura 2.1.3c se muestra el MDE de la NASA (SRTM 4.1), con un paso espacial de 90m, recortado para la Provincia de Misiones.



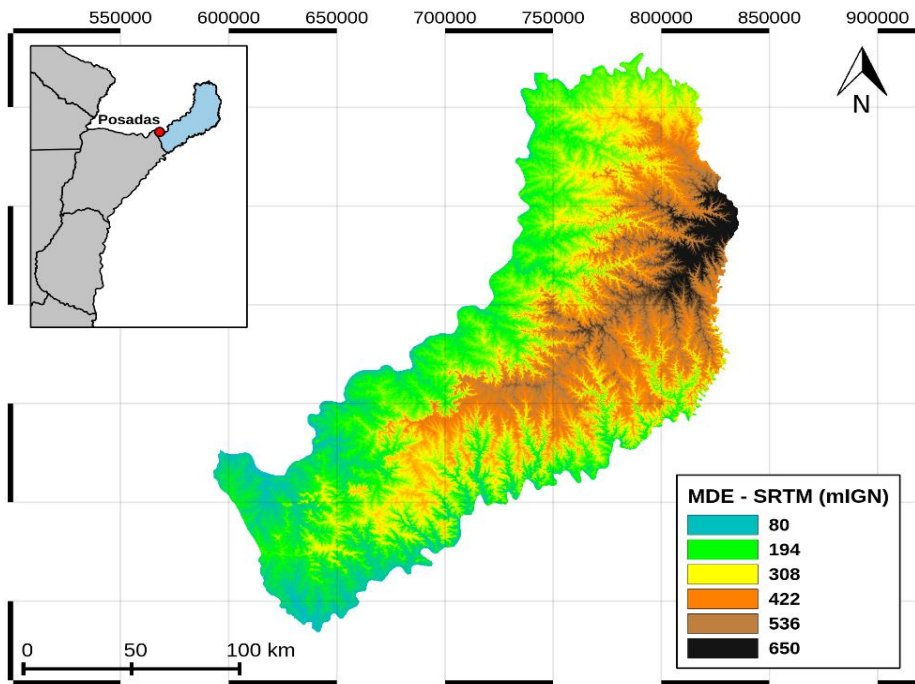
a) IGN

² SRTM-AR (<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>)

³ CGIAR-CSI SRTM 90M DEM Digital Elevation Database (srtm.csi.cgiar.org)



b) SRTM - AR



c) SRTM 4.1

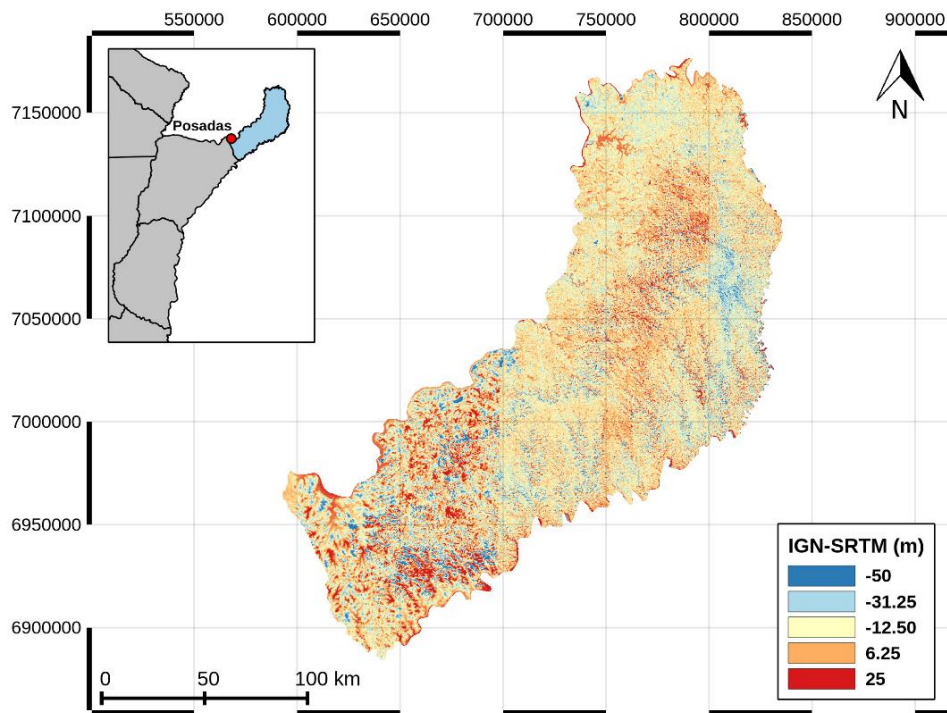
Figura 2.1.3. MDE del terreno de acuerdo a distintas fuentes.

La Figura 2.1.3 presenta las diferencias entre los MDE, tomando como referencia el SRTM 4.1. Se observan diferencias relativamente pequeñas para el SRTM-AR, lo cual era de esperarse al provenir ambos de la misma fuente de datos. En el caso del resultante de las curvas de nivel del IGN, las mayores diferencias se dan al sudoeste de la provincia, en la zona llana, donde esas curvas no tienen una resolución suficiente como para representar correctamente la topografía, tal como se había indicado. Las diferencias que se dan en el noreste de Misiones se deben a que, por tratarse de un relieve de altas pendientes, pequeños corrimientos horizontales (por problemas de georreferenciación) pueden producir importantes diferencias en la vertical.

2.2 DATOS HIDROLÓGICOS

2.2.1 Red hidrográfica

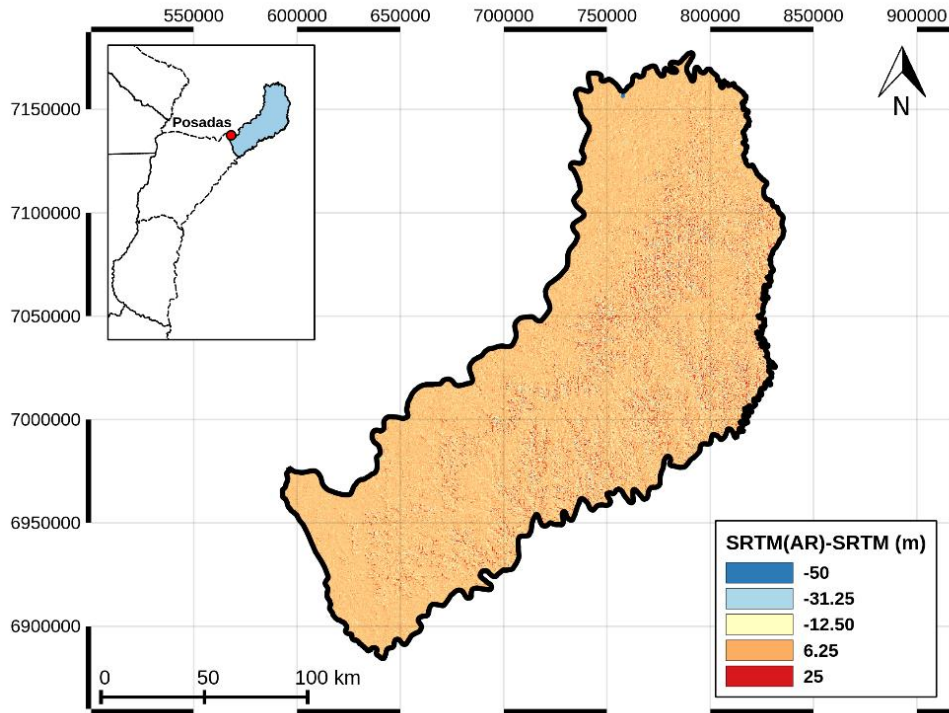
La Figura 2.2.1 presenta un detalle de la red hidrográfica de la Provincia Misiones⁴, identificándose los ríos hacia los cuales drenan los arroyos interiores.



a) Diferencias entre IGN y SRTM 4.1

⁴ IGN, cursos de agua, Agosto 2015.

(http://www.ign.gov.ar/archivos/sig250/001_Cursos_De_Agua.zip)



b) Diferencias entre SRTM-AR y SRTM 4.1

Figura 2.1.3. Diferencias entre MDEs.

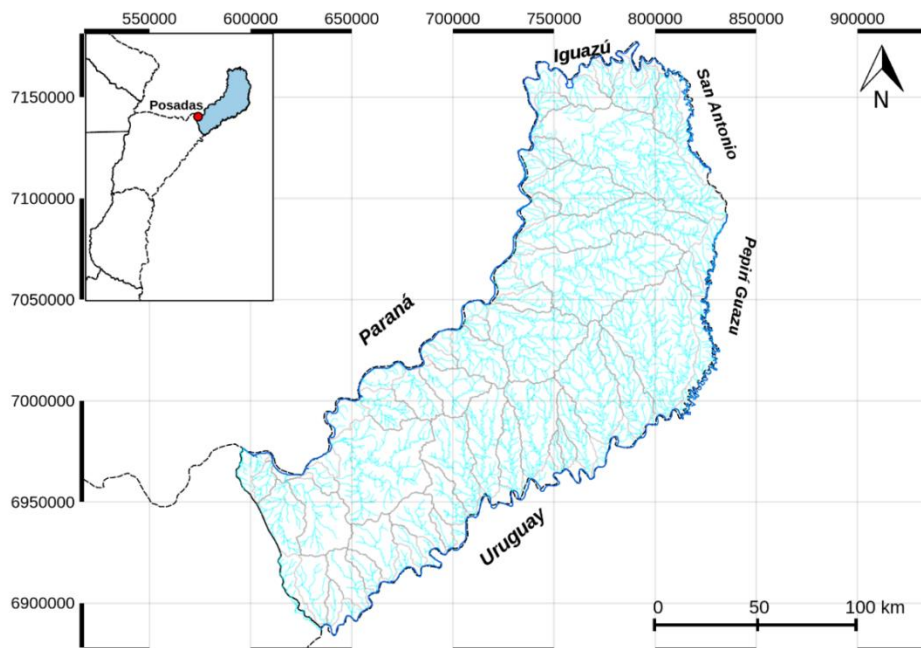


Figura 2.2.1. Red hidrográfica de la Provincia de Misiones

2.2.2 Cuencas

Se determinaron las Cuencas hídricas de la Provincia de Misiones a partir de los MDE del terreno. Si bien, como se mostró anteriormente, existen diferencias altimétricas entre los MDE, en el trazado de las cuencas los resultados son consistentes entre sí, independientemente del MDE empleado.

En la Figura 2.2.2 se muestran las 45 cuencas (tres de ellas sin nombre) con un área mayor a 100 km² que surgen a partir del SRTM 4.1. No se discriminaron cuencas con áreas menores a dicho valor por considerarse que su contribución al potencial hidroeléctrico es despreciable, y por ubicarse próximas a los cuerpos receptores (en la Figura 2.2.1 se muestran como regiones en blanco).

En lo que respecta a la descarga, 21 lo hacen sobre el río Paraná, 19 sobre el Uruguay, 4 sobre el Iguazú y 1 sobre el Pepirí Guazú. En la Tabla 2.2.1 se indica el área de cada cuenca y su cuerpo receptor.

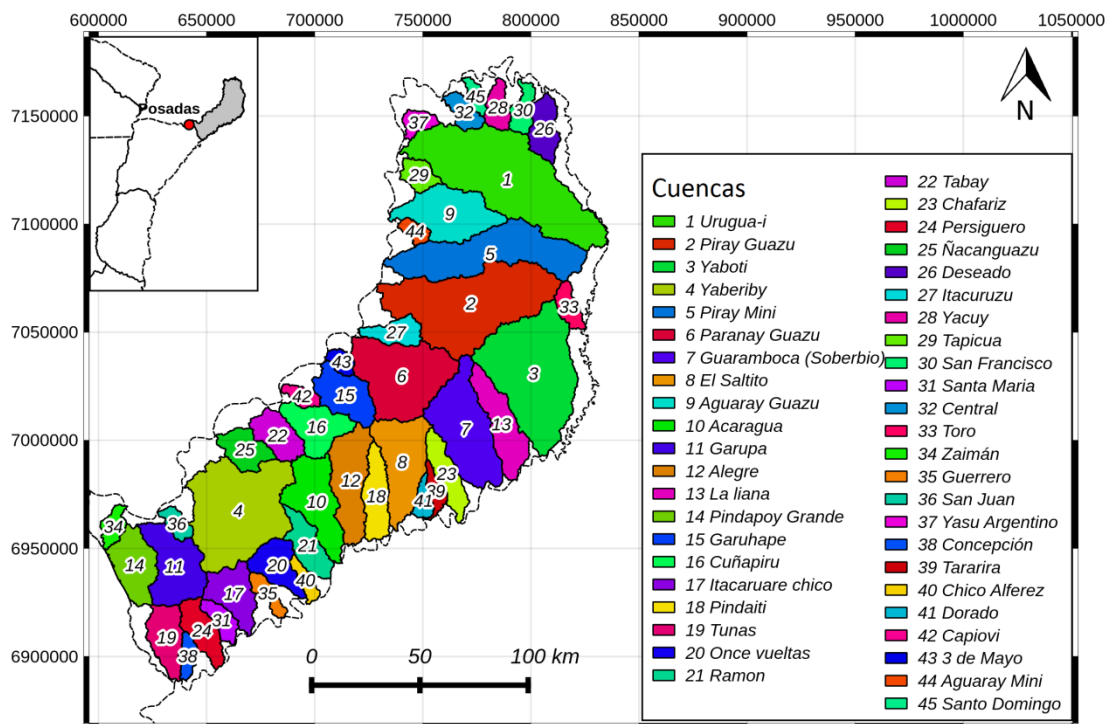


Figura 2.2.2. Principales cuencas de la Provincia de Misiones.

Tabla 2.2.1. Principales cuencas de la Provincia de Misiones.

	Nombre	Area (km²)	Cuerpo receptor
01	Urugua-i	2528	Paraná
02	Piray Guazu	2135	Paraná
03	Yaboti	1997	Uruguay
04	Yabebiry	1869	Paraná
05	Piray Mini	1459	Paraná
06	Paranay Guazu	1311	Paraná
07	Guaramboca (Soberbio)	1153	Uruguay
08	El Saltito	857	Uruguay
09	Aguaray Guazu	853	Paraná
10	Acaragua	774	Uruguay
11	Garupa	764	Paraná
12	Alegre	757	Uruguay
13	La liana	608	Uruguay
14	Pindapoy Grande	554	Paraná
15	Garuhape	509	Paraná
16	Cuñapiru	508	Paraná
17	Itacaruaire chico	477	Uruguay
18	Pindaiti	430	Uruguay
19	Tunas	424	Uruguay
20	Once vueltas	391	Uruguay
21	Ramon	374	Uruguay
22	Tabay	373	Paraná
23	Chafariz	361	Uruguay
24	Persiguero	354	Uruguay
25	Ñacanguazu	338	Paraná
26	Deseado	325	Iguazú
27	Itacuruzu	258	Paraná
28	Yacuy	205	Iguazú
29	Tapicua	195	Paraná
30	San Francisco	195	Iguazú
31	Santa Maria	185	Uruguay
32	Central	185	Iguazú
33	Toro	179	Pepiri Guazu
34	Zaimán	154	Paraná
35	Guerrero	151	Uruguay
36	San Juan	143	Paraná
37	Yasu Argentino	142	Paraná
38	Concepcion	132	Uruguay
39	Tararira	130	Uruguay
40	Chico Alferez	128	Uruguay
41	Dorado	121	Paraná
42	Capiovi	121	Uruguay
43	3 de Mayo	112	Paraná

2.2.3 Clima

La Provincia de Misiones tiene un clima Subtropical sin estación seca. Una característica es que presenta en su geografía cordones serranos en su parte central y norte. Estas elevaciones permiten que las temperaturas se ubiquen en valores más bajos a los que les correspondería de acuerdo a la latitud. Es por ello que la temperatura de las localidades ubicadas en zonas serranas difiere respecto de la de la ciudad de Posadas, que se encuentra al sur de estas localidades. Cabe destacar que el extremo sudoeste de la provincia es el más bajo y el que registra mayor temperatura⁵.

De acuerdo al Gran Atlas de Misiones⁶, las precipitaciones acumuladas anuales en esta región (Figura 2.2.3) tienen un máximo marcado por la isohieta de 2000 mm, ubicada en la región Este, disminuyendo hacia el Oeste hasta llegar a los 1600 mm medios anuales como mínimo, cerca de la frontera con la Provincia de Corrientes. Hacia el norte también disminuye, con 1700 mm en las cuencas que descargan al río Iguazú. El régimen anual de precipitaciones es similar en toda la provincia, con un período más seco durante el invierno (meses de julio y agosto) y máximos en los meses de abril y octubre.

Las temperaturas medias anuales muestran un gradiente decreciente en la dirección Noreste-Sudoeste, con un máximo de 26°C cerca de la frontera con Corrientes y un mínimo de 22°C cercano a la localidad de Bernardo de Irigoyen, donde las alturas llegan hasta los 800 metros, mostrando la influencia de la orografía en la temperatura (ver Figura 2.1.1).

La temperatura media anual de Posadas es de 21,2°, en Iguazú de 20,7°, en Oberá de 20,8° y en Bernardo de Irigoyen de 18,3°. Las temperaturas más altas de verano se ubican entre 35° y 40°. Una marca histórica fue la anotada en Posadas en enero de 1986 con 42°, en tanto que a fines del año 85 las localidades de Cerro Azul y Montecarlo registraron 41,4° de máxima. En invierno las pocas invasiones de aire polar pueden llegar a provocar heladas, con temperaturas mínimas levemente por debajo de 0°. Existen antecedentes de caída de nieve, sin acumulación, en las serranías de la provincia. En invierno de 1975 se produjo una importante nevada, con acumulación en la localidad de Bernardo de Irigoyen, ubicada en el extremo centro-este de Misiones. Esta localidad, por su altura por sobre el nivel del mar (815 mts), es una de las más frías de la provincia en invierno.

Los vientos dominantes provienen del ESE en el sur de la provincia, y del NE en el norte de la misma. Los promedios de presión atmosférica reducidos a nivel del mar se acercan a los 1013 hpa.

⁵ <http://www.mineria.gob.ar/estudios/irn/misiones/m-1.asp>

⁶ Gran Atlas de Misiones, Instituto Provincial de Estadísticas y Censos (IPEC), 2012.

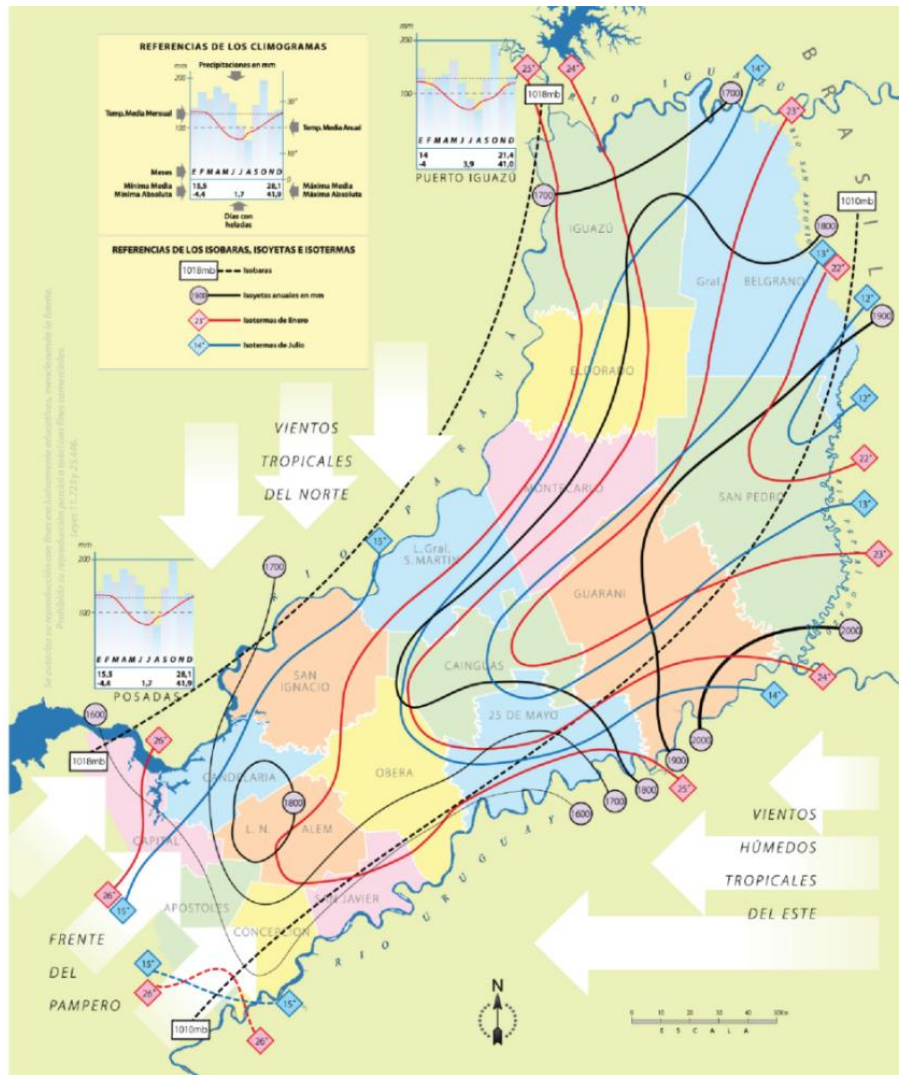
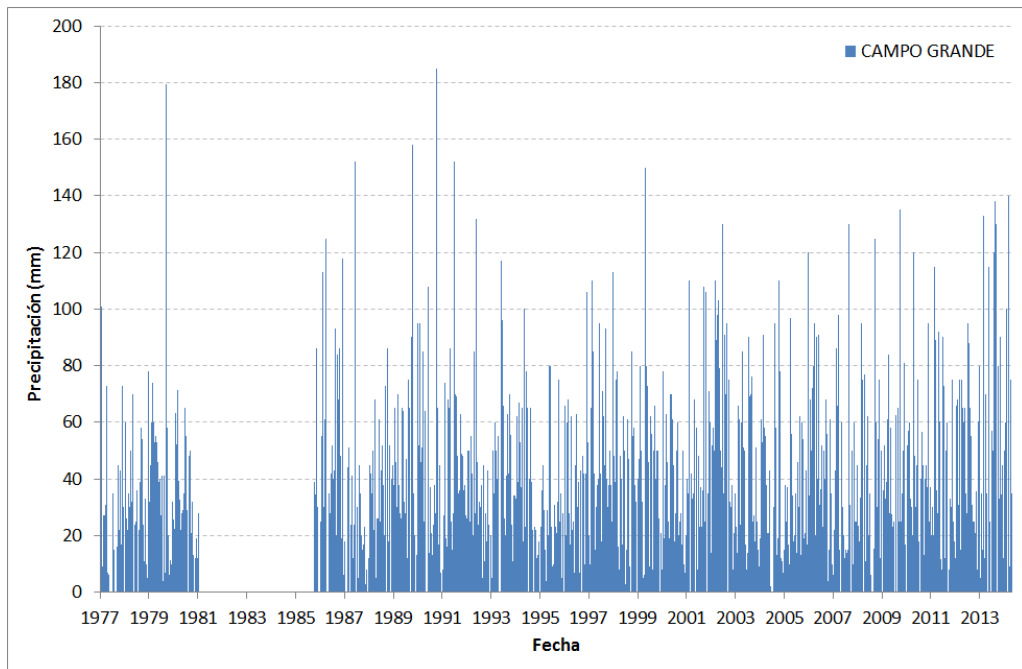


Figura 2.2.3. Isohietas, isotermas e isobaras de la Provincia de Misiones (Fuente: Gran Atlas de Misiones)

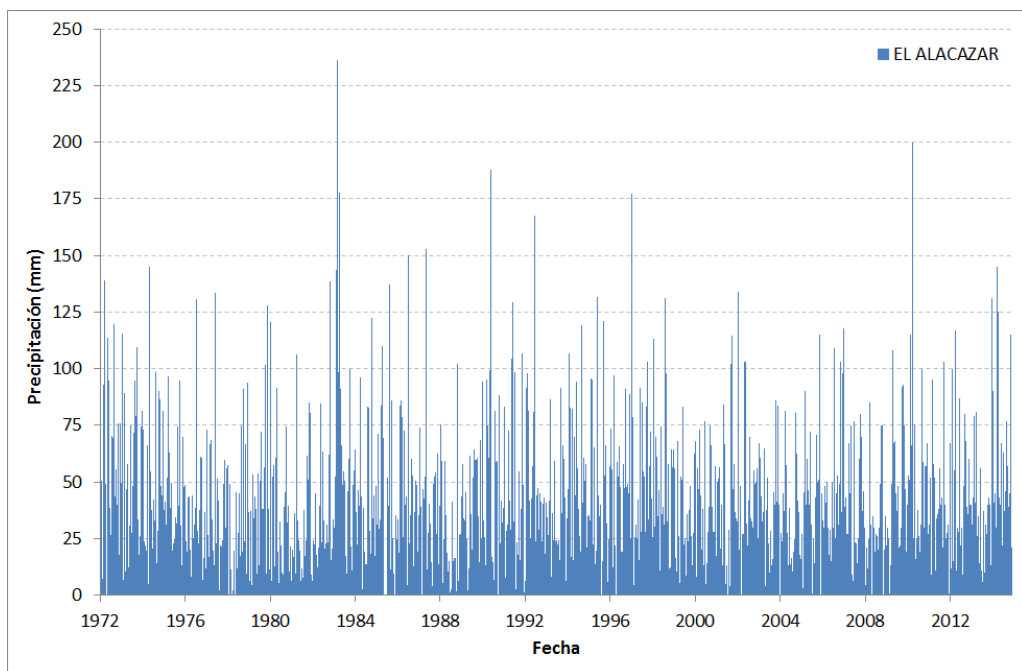
2.2.4 Precipitaciones

La Figura 2.2.4 presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas localizadas dentro de la Provincia de Misiones. En la Tabla 2.2.2 y la Figura 2.2.5 se indican las series temporales disponibles en la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos), de paso diario, asociadas a cursos de agua. Las mediciones se inician en la década del 60 o 70, y se extienden hasta la actualidad. La completitud de las series de datos se representa en la Figura 2.2.6.

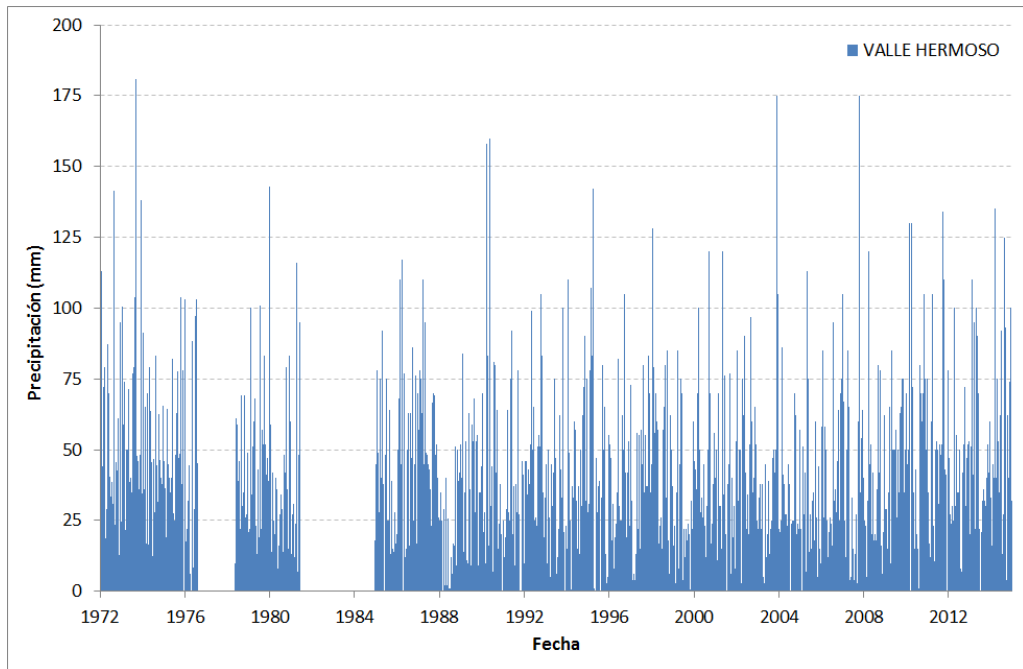
La Figura 2.2.6 muestra registros de series temporales de paso diario correspondientes a estaciones del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) y el INTA.



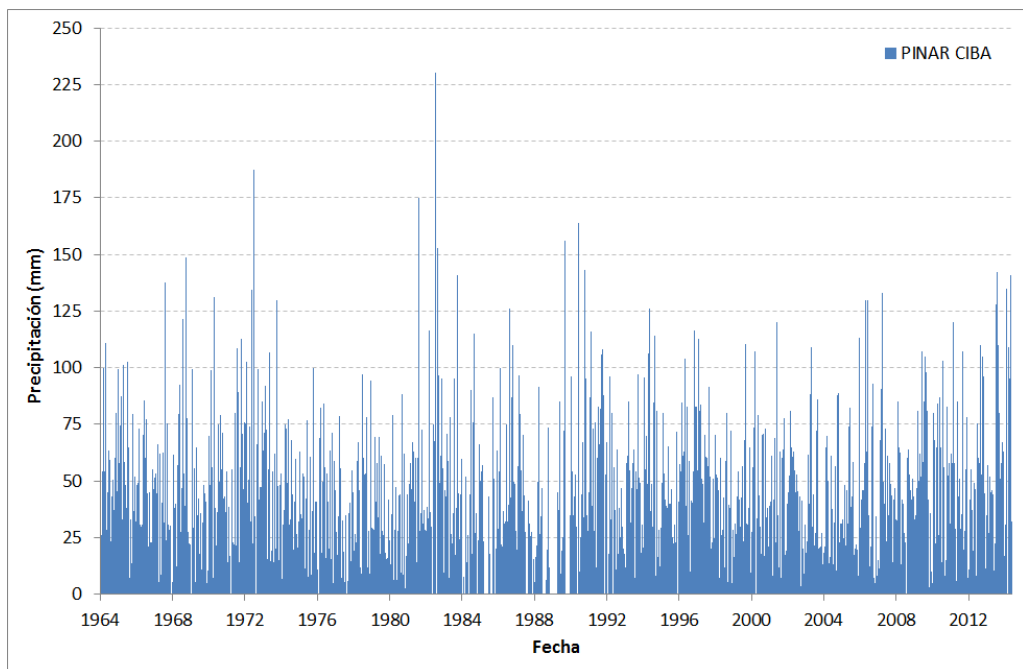
a) Campo Grande



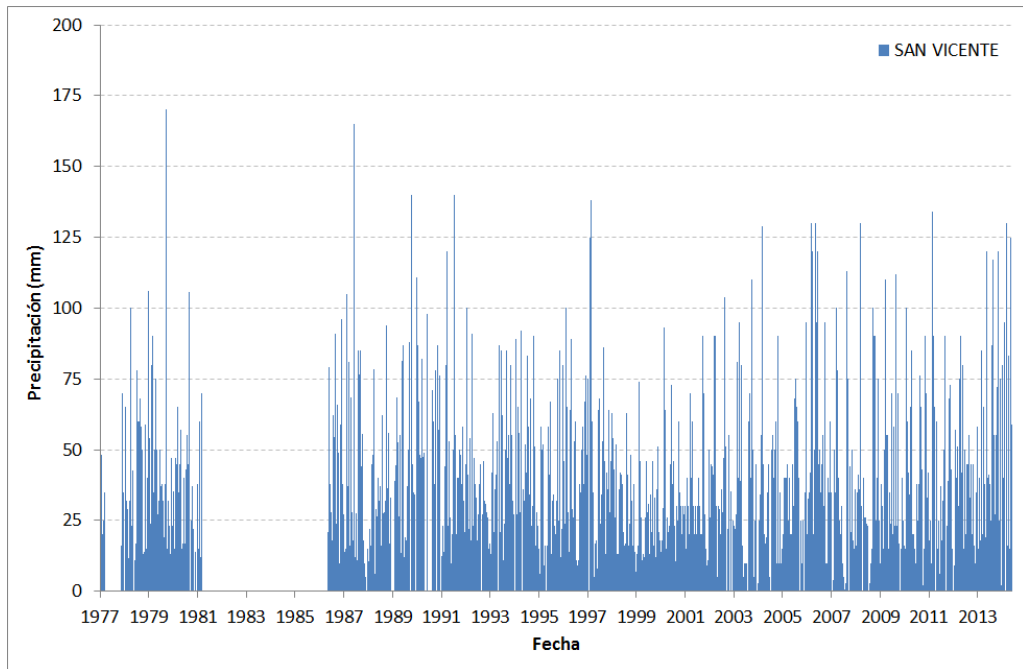
b) El Alcazar



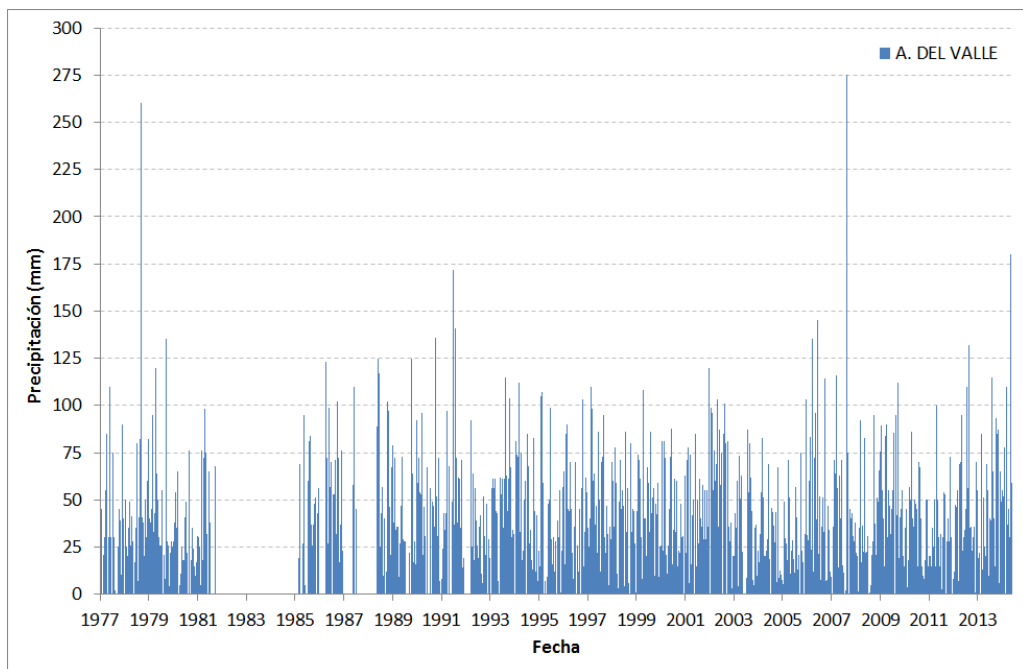
c) Valle Hermoso



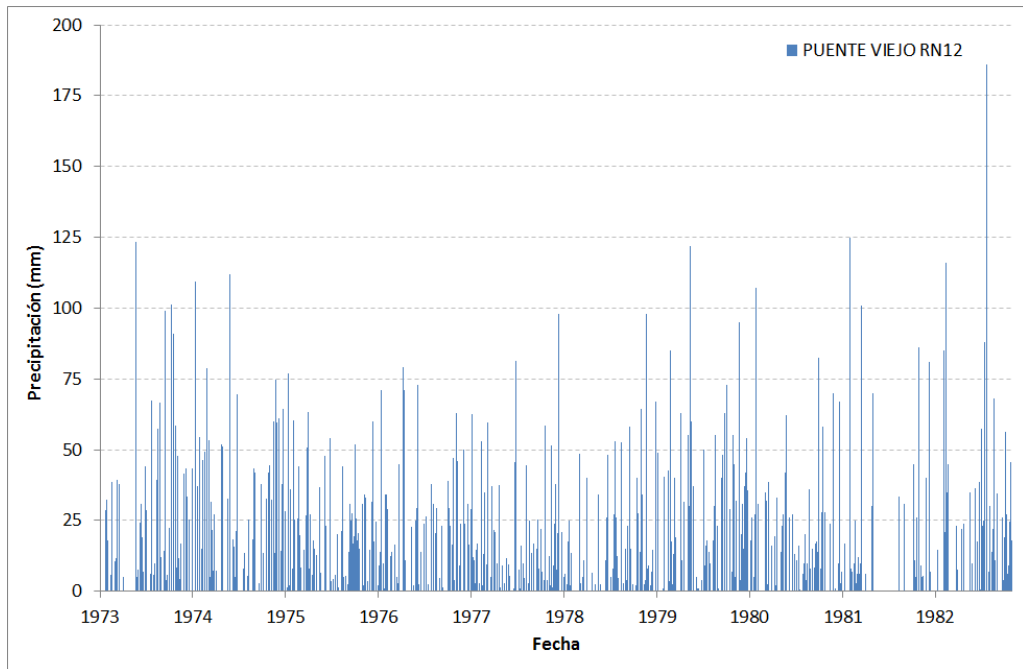
d) Pinar C.I.B.A.



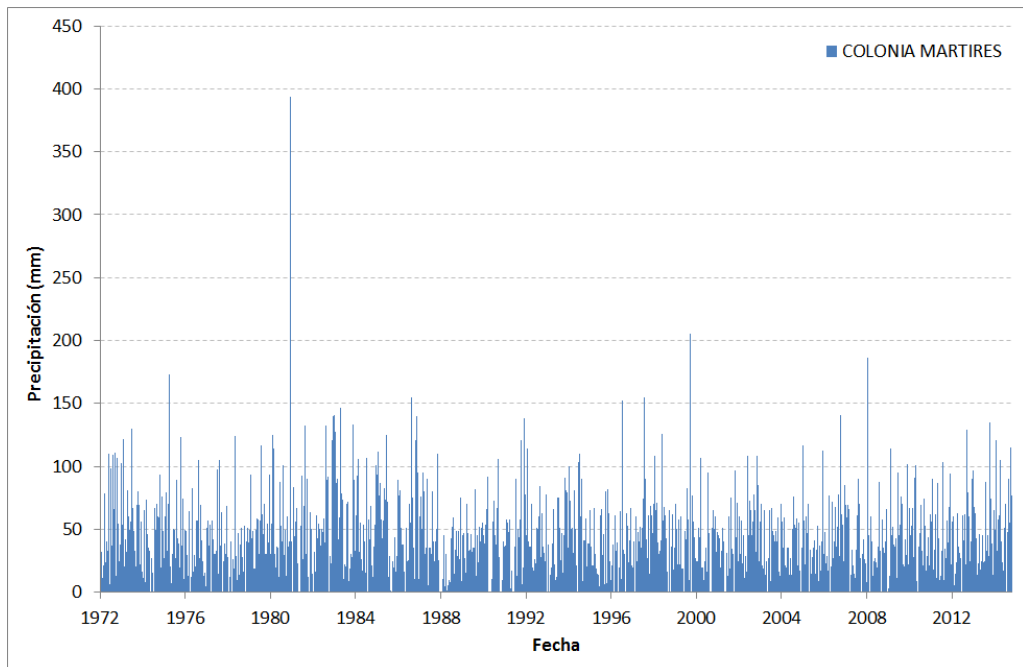
e) San Vicente



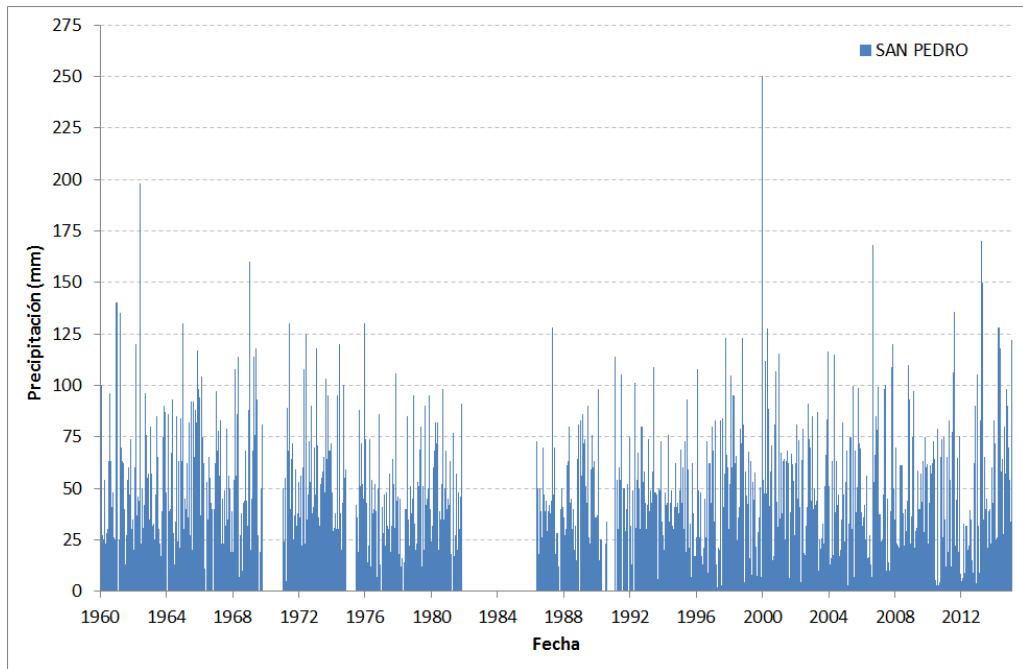
f) Arroyo del Valle



g) Puento Viejo RN12

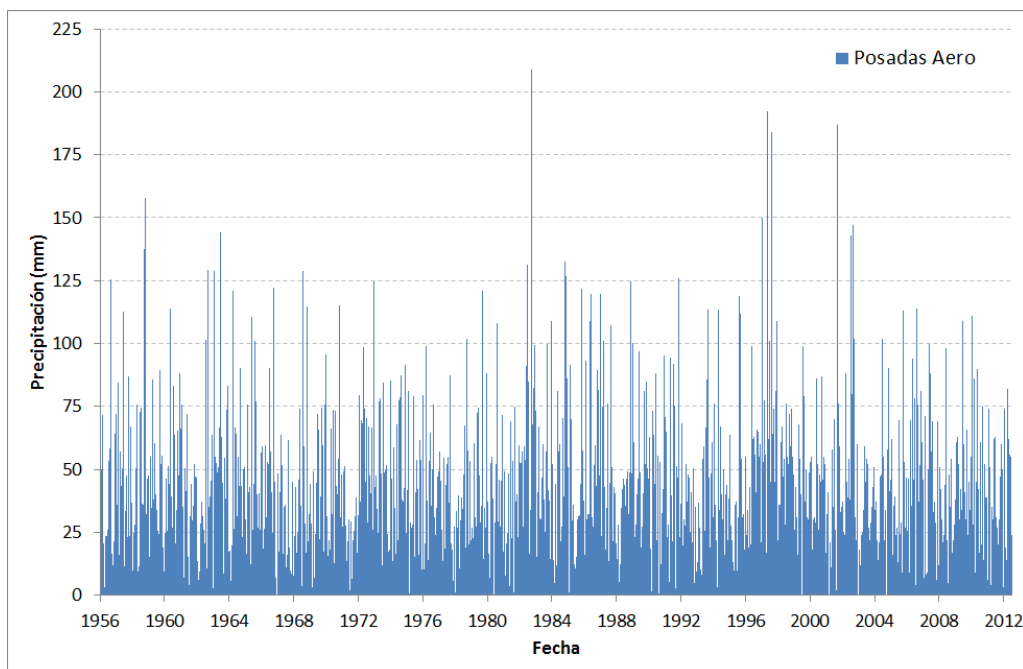


h) Colonia Martires

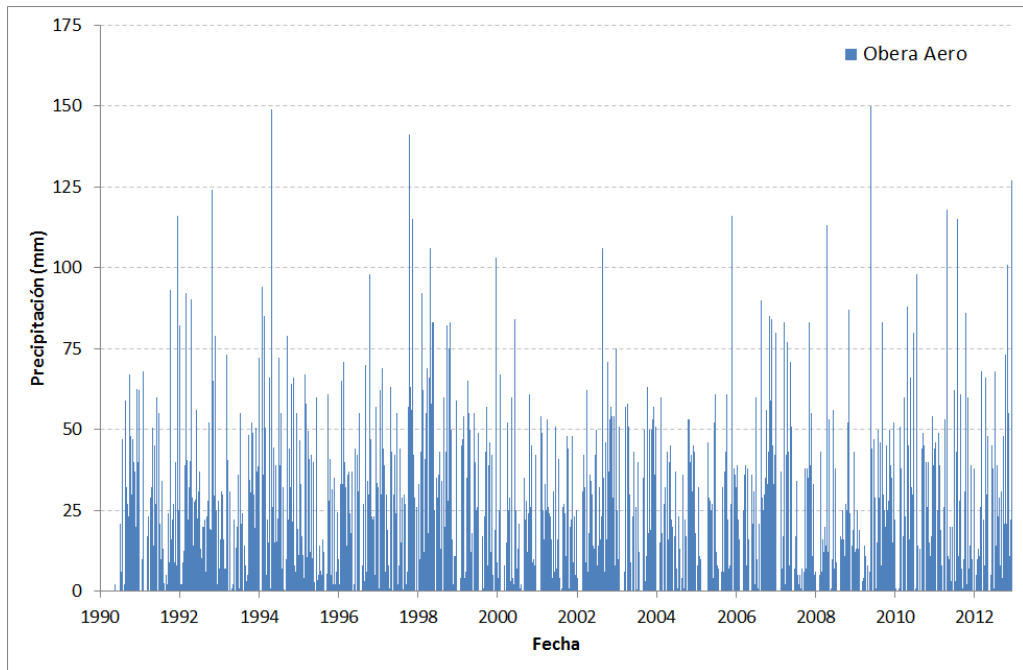


i) San Pedro

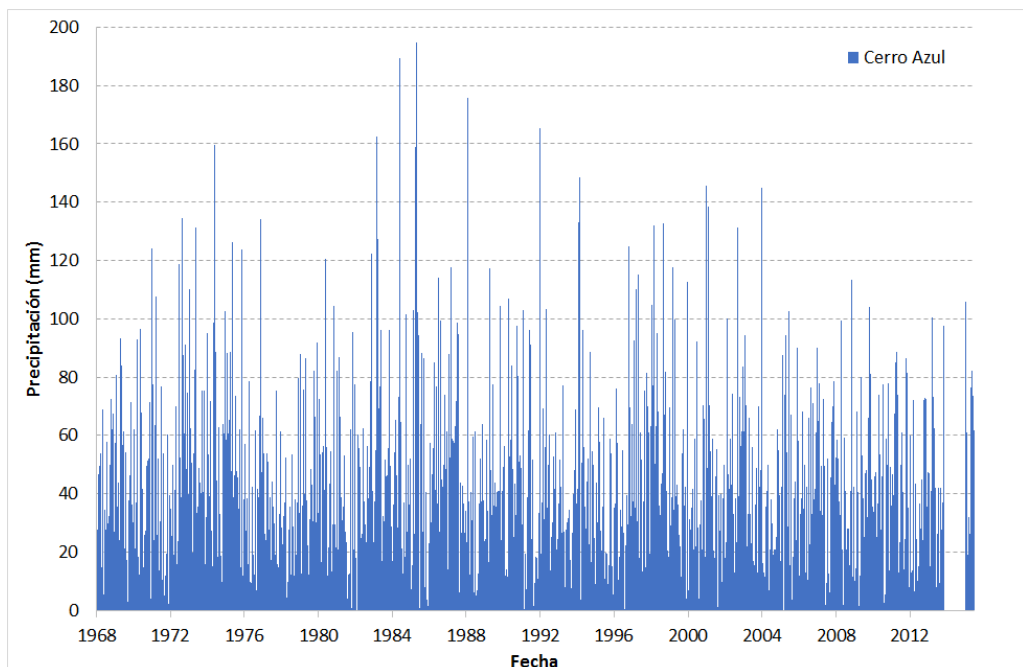
Figura 2.2.6. Precipitaciones diarias en estaciones de la base de datos de la SSRH



a) Posadas (SMN)



b) Oberá (SMN)

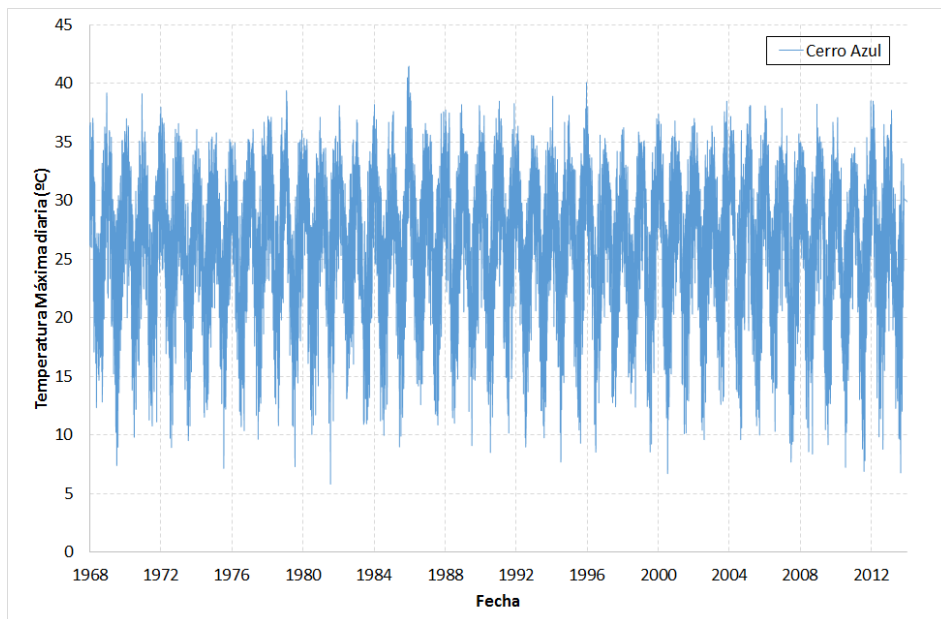


c) Cerro Azul (INTA)

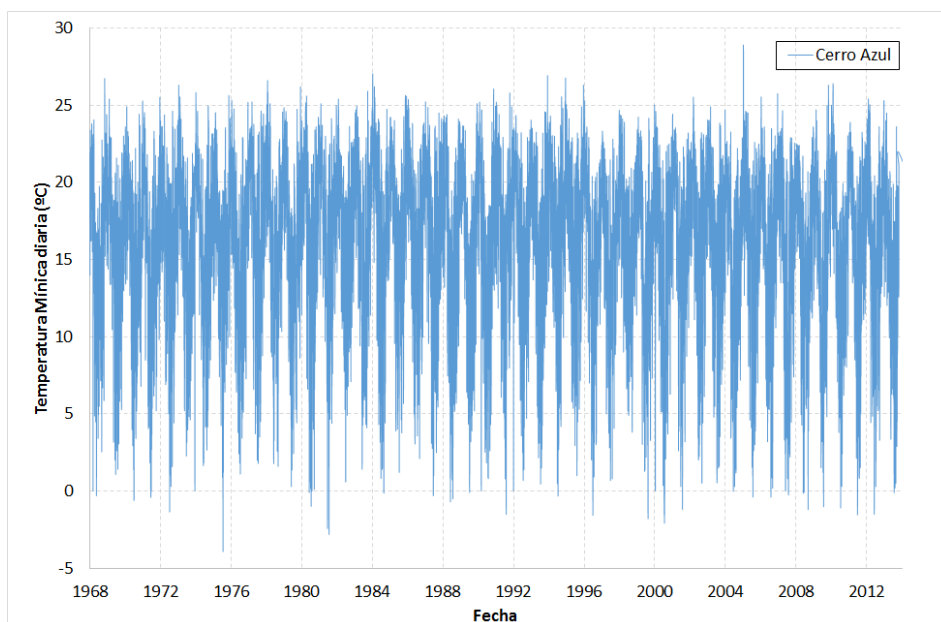
Figura 2.2.6. Precipitaciones diarias en estaciones del SMN e INTA

2.2.5 Temperatura

En la Figura 2.2.7 se muestran las temperaturas máxima y mínima diaria en la estación Cerro Azul (INTA) desde 1968 a 2014. La Figura 2.2.8, por su parte, presenta el ciclo anual de temperaturas máximas y mínimas promedio diarias para la misma estación. El promedio anual de la temperatura máxima promedio diaria resulta ser de 26,3°C, mientras que el de la mínima de 16,0°C.



a) Temperatura Máxima



b) Temperatura Mínima

Figura 2.2.7. Temperaturas extremas diarias en estación Cerro Azul.

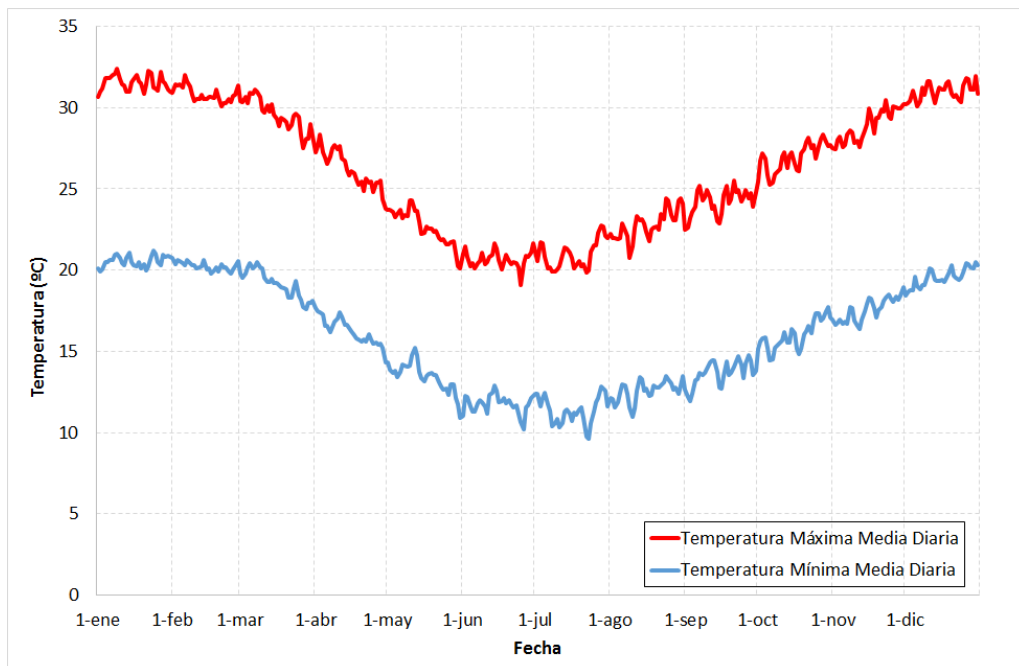


Figura 2.2.8. Temperaturas mínima y máxima promedio diaria en estación Cerro Azul.

2.2.6 Heliofanía

La heliofanía indica la cantidad de horas de sol directa. La Figura 2.2.9 presenta la serie diaria de heliofanía en la estación Cerro Azul (INTA). El valor máximo es cercano a las 13 horas diarias en el solsticio de verano, y 9,3 horas en el solsticio de invierno.

En la Figura 2.2.10 se representa el correspondiente ciclo anual de heliofanía promedio diaria, donde se observan valores del orden de 9 horas diarias de luz en verano y 5 horas en invierno.

2.2.7 Viento

La Figura 2.2.11 muestra la serie de vientos medios diarios, medidos a 2m de altura, en la estación Cerro Azul. Se nota el cambio de método de medición a partir de 1990, registrándose desde entonces valores diarios con mayor amplitud (desde 30km/h hasta días con calma).

En la Figura 2.2.12 se presenta el ciclo anual de vientos promedio diarios para el período 1990-2014. Se observan mayores valores durante la primavera (del orden de 6,5 km/h) y mínimos en otoño (del orden de 4,5 km/h).

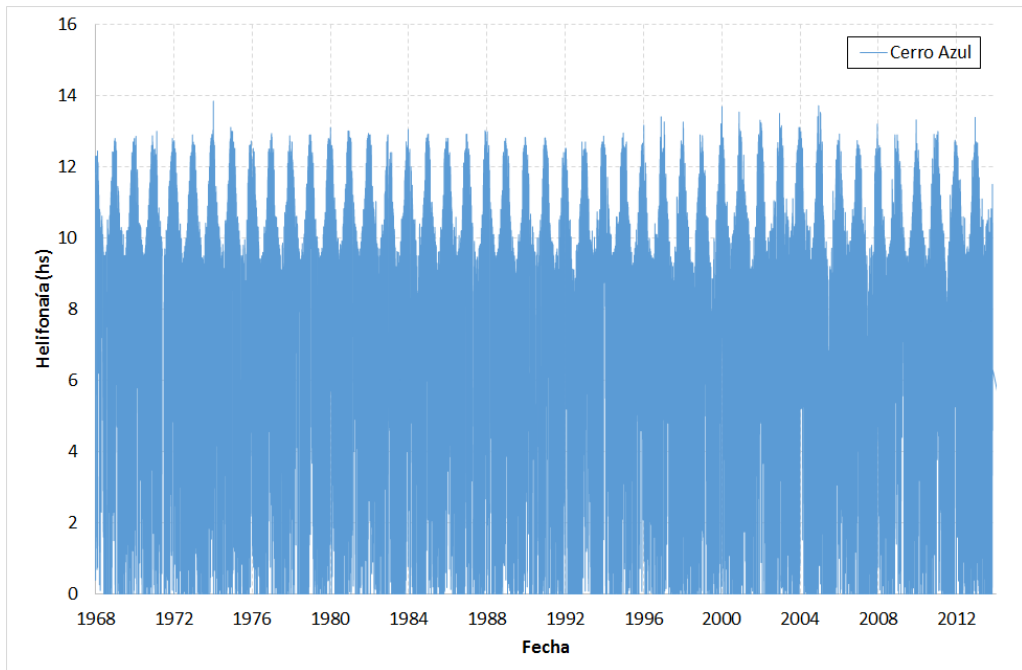


Figura 2.2.9. Serie de heliofanía diaria en estación Cerro Azul.

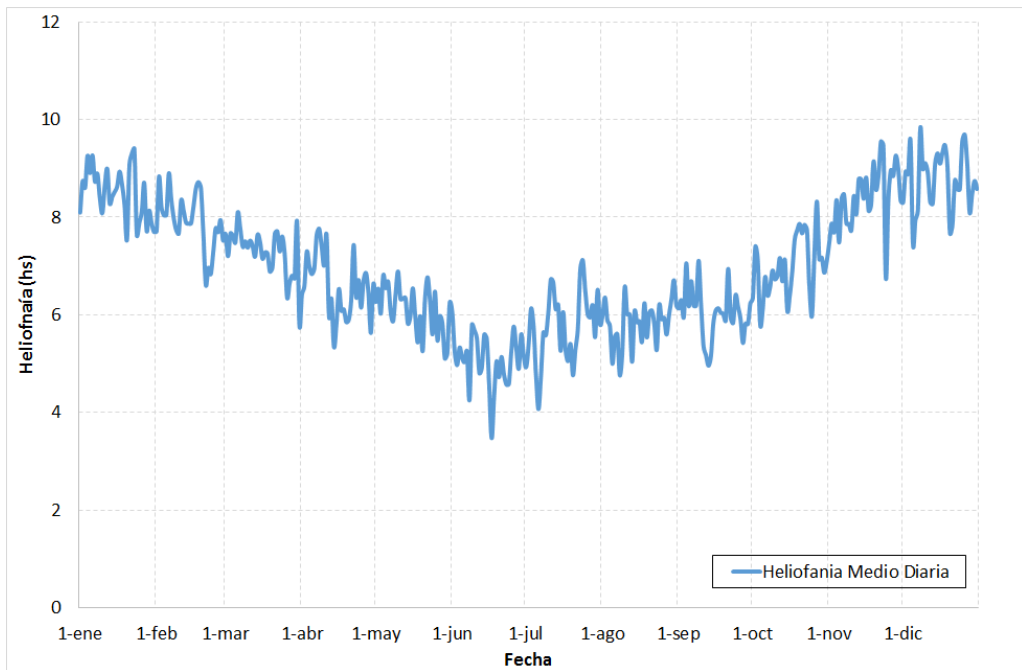


Figura 2.2.10. Heliofanía media diaria en estación Cerro Azul.

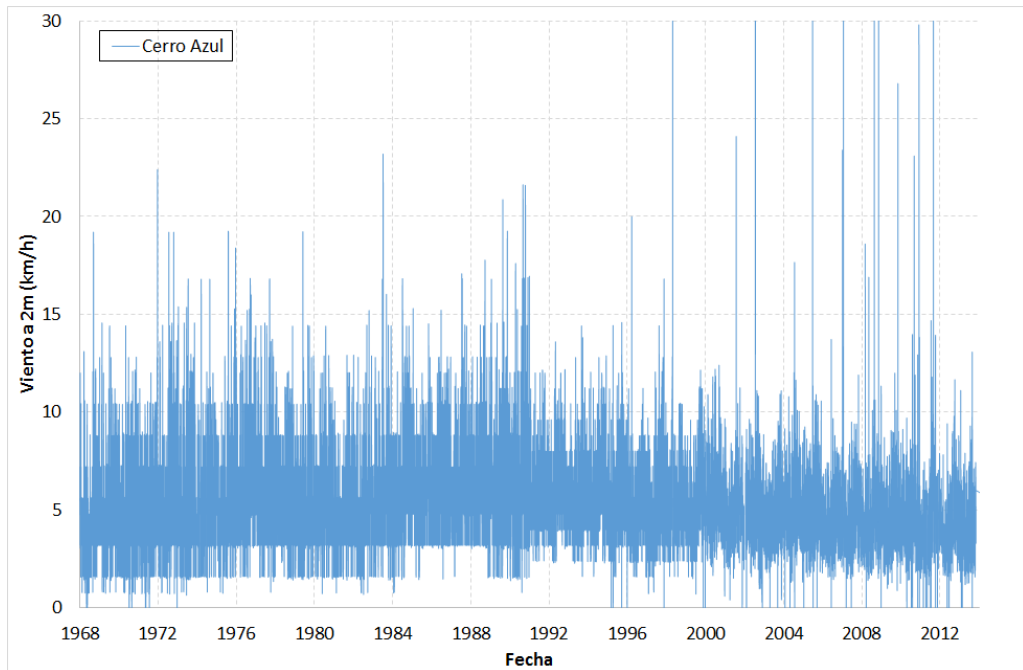


Figura 2.2.11. Serie temporal de viento medio diario en estación Cerro Azul.

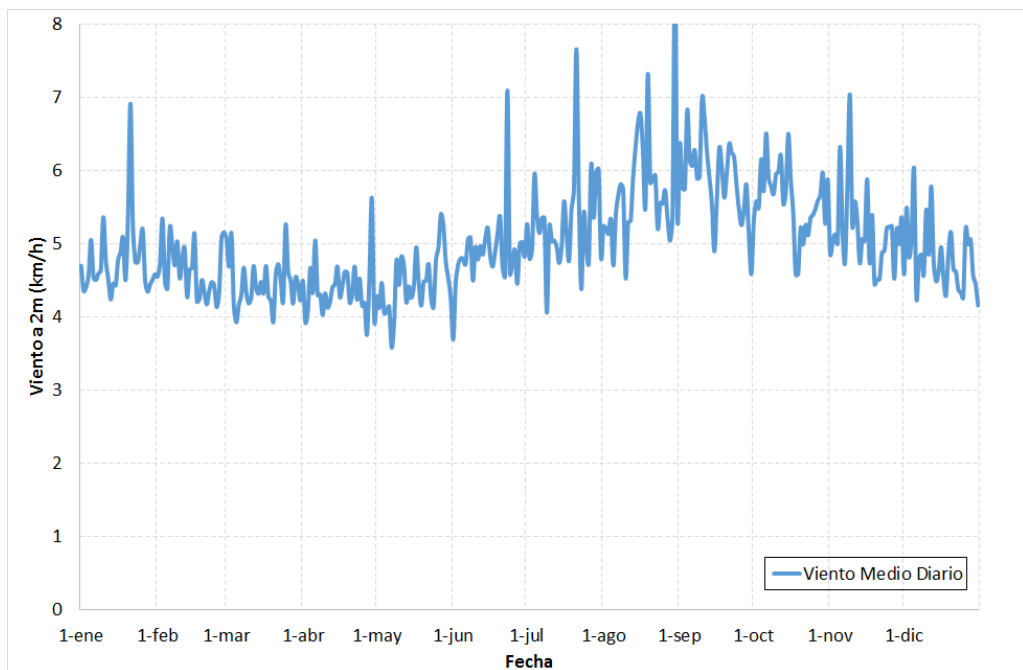


Figura 2.2.12. Vientos promedio diarios a 2m en estación Cerro Azul.

2.2.8 Humedad Relativa

En la Figura 2.2.13 se muestra la serie de humedad relativa media diaria en la estación Cerro Azul, que indica valores máximos diarios del 100% (atmósfera saturada) y mínimos de 25%. Por su parte, la Figura 2.2.14 presenta el ciclo anual de humedad relativa promedio diaria. Se observan valores del orden del 80% en el invierno, y del 65% a finales de primavera y comienzos del verano.

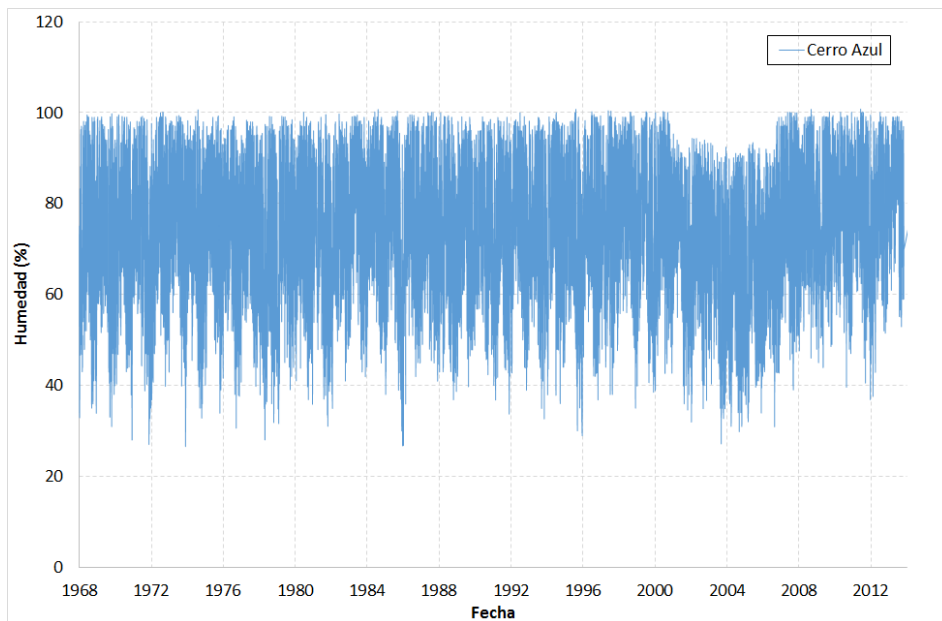


Figura 2.2.13. Serie de humedad relativa media diaria en estación Cerro Azul.

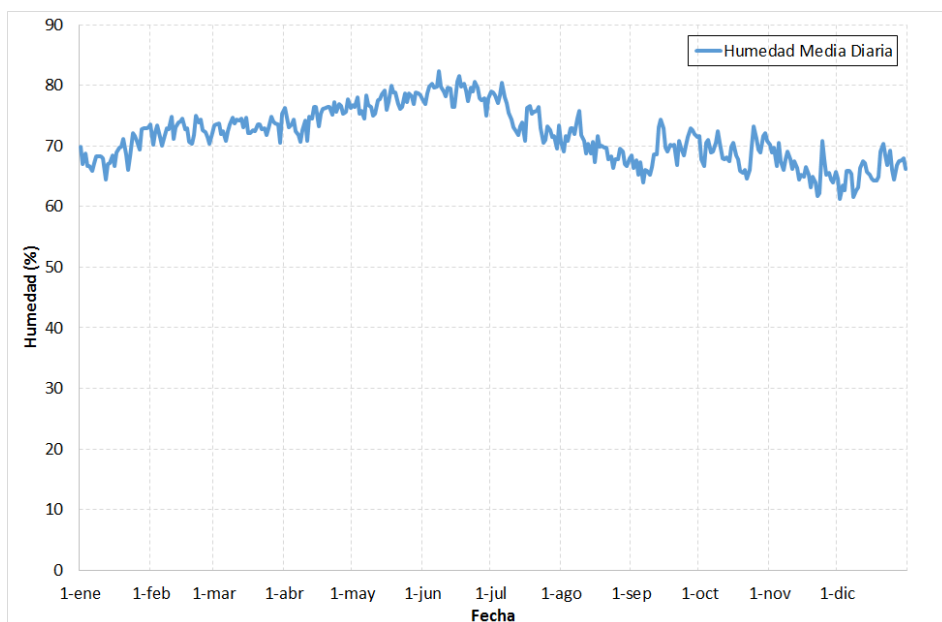


Figura 2.2.14. Humedad relativa promedio diaria en estación Cerro Azul.

2.2.9 Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración a paso diario se utilizó el método de Penman-Monteith, que emplea datos de temperatura mínima y máxima diaria, viento a 2m y humedad relativa. En la Figura 2.2.15 se muestra la serie de evapotranspiración medio diaria resultante en la estación Cerro Azul, donde se dispone de toda esa información.

El ciclo anual de evapotranspiración promedio diaria se presenta en la Figura 2.2.16. Se observan valores del orden de 6 mm en verano y de 2 mm en invierno.

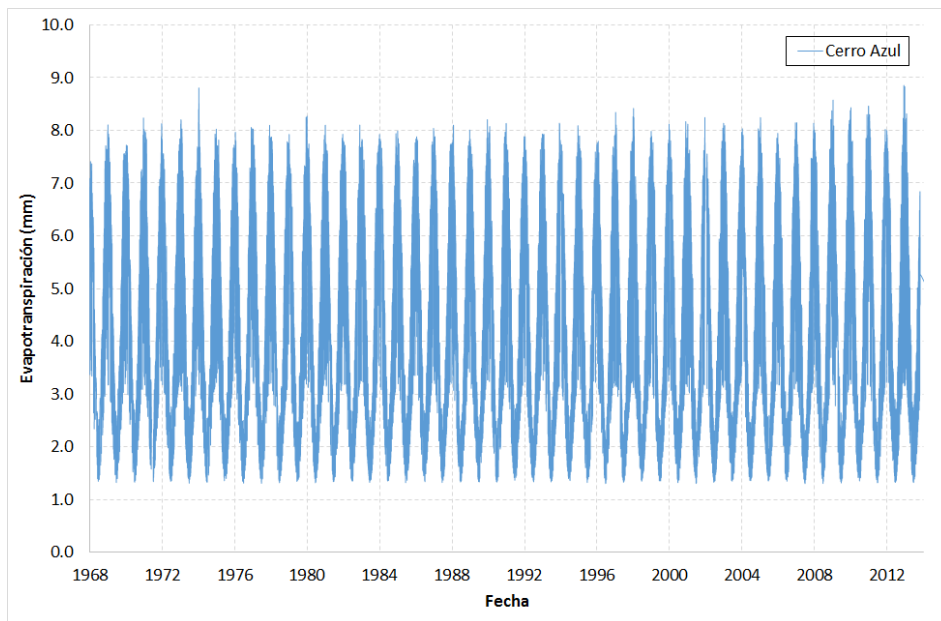


Figura 2.2.15. Serie de evapotranspiración media diaria en estación Cerro Azul.

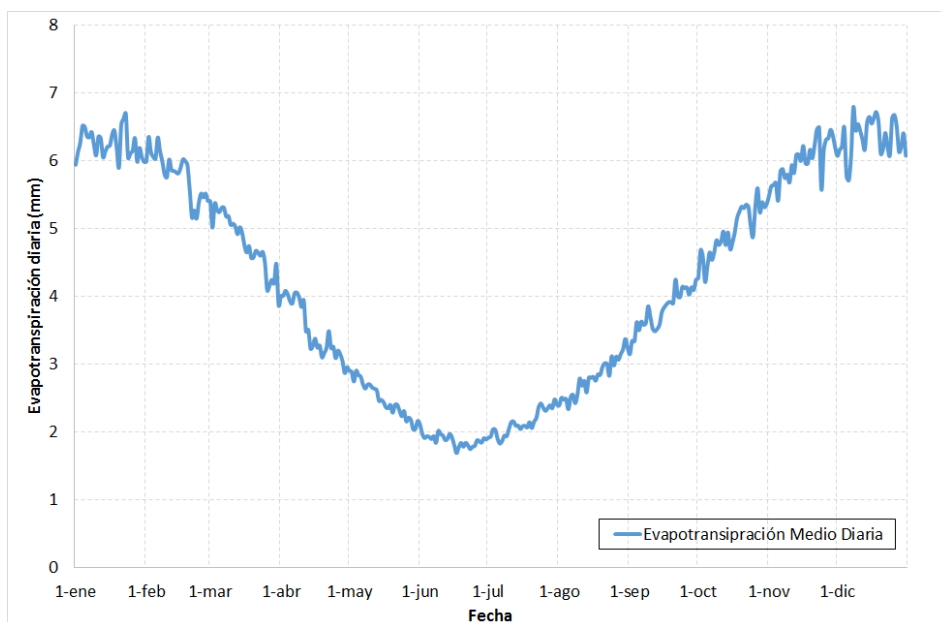


Figura 2.2.16. Evapotranspiración promedio diaria en estación Cerro Azul.

2.2.10 Hidrometría

Se contó con datos de caudales correspondientes a 7 estaciones de aforo operadas por la SRHH, cuya ubicación se muestra en la Figura 2.2.17. Comparando con la Figura 2.2.2 se observa que corresponden a las cuencas de mayor extensión, todas las cuales desembocan en el río Paraná.

La Figura 2.2.18 muestra las ventanas de tiempo con registros para cada estación. Si bien algunas series están discontinuadas, las cuencas del Yaberiby, Paranay, Piray Guazú y Piray Mini cuentan con registros desde la década de 1960 hasta la actualidad.

La información hidrométrica disponible puede clasificarse en:

- Series de caudales diarios.
- Series de alturas en escalas locales.
- Series de aforos, que permiten construir curvas altura-caudal.

La Figura 2.2.19 presenta las series de caudales diarios de Piray Mini, Piray Guazú y Paranay.

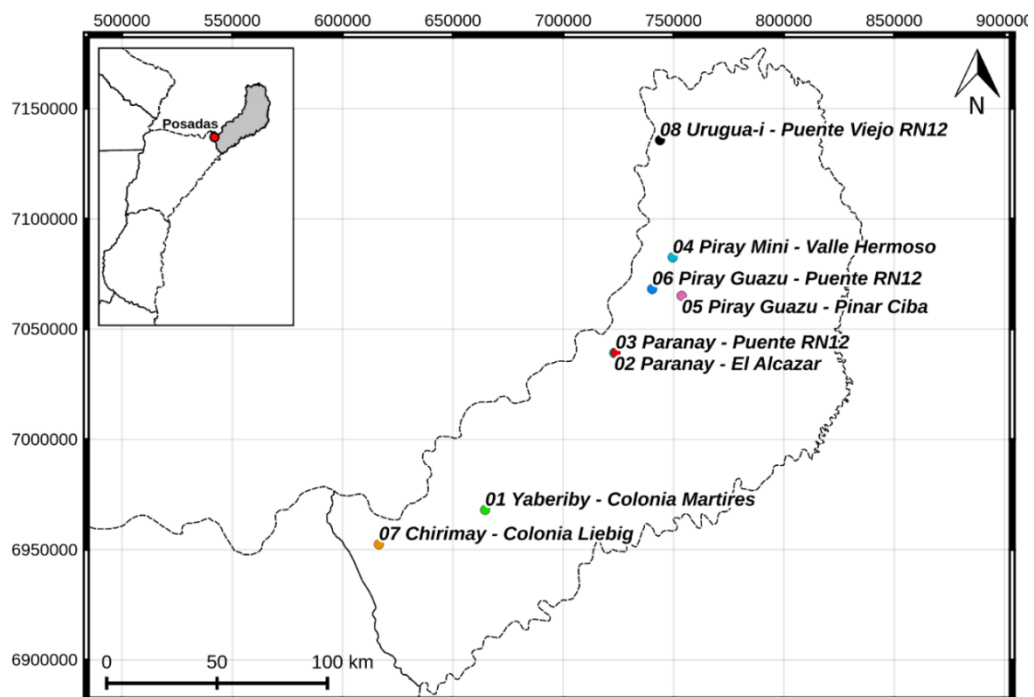
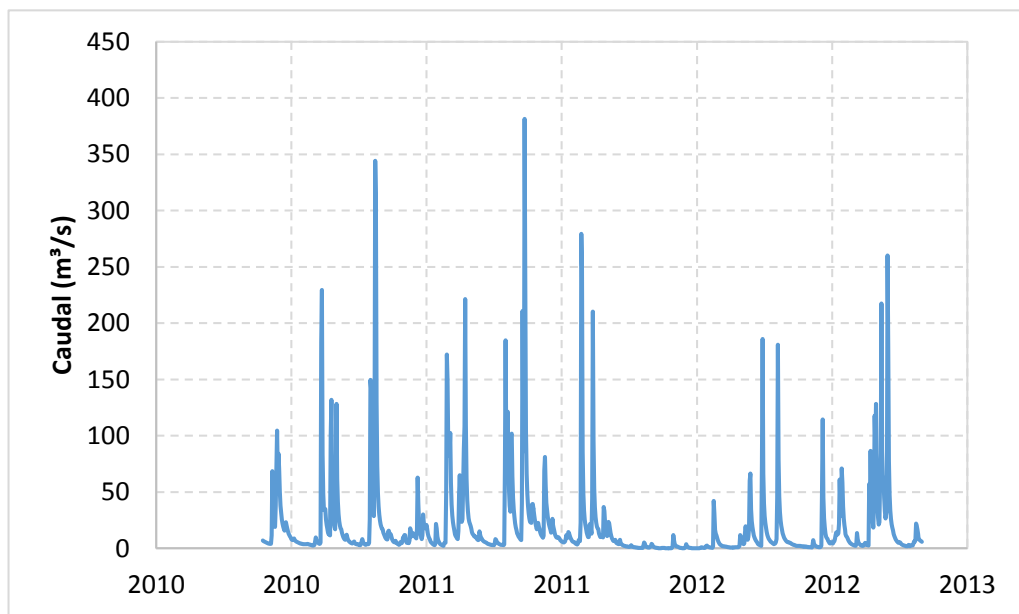


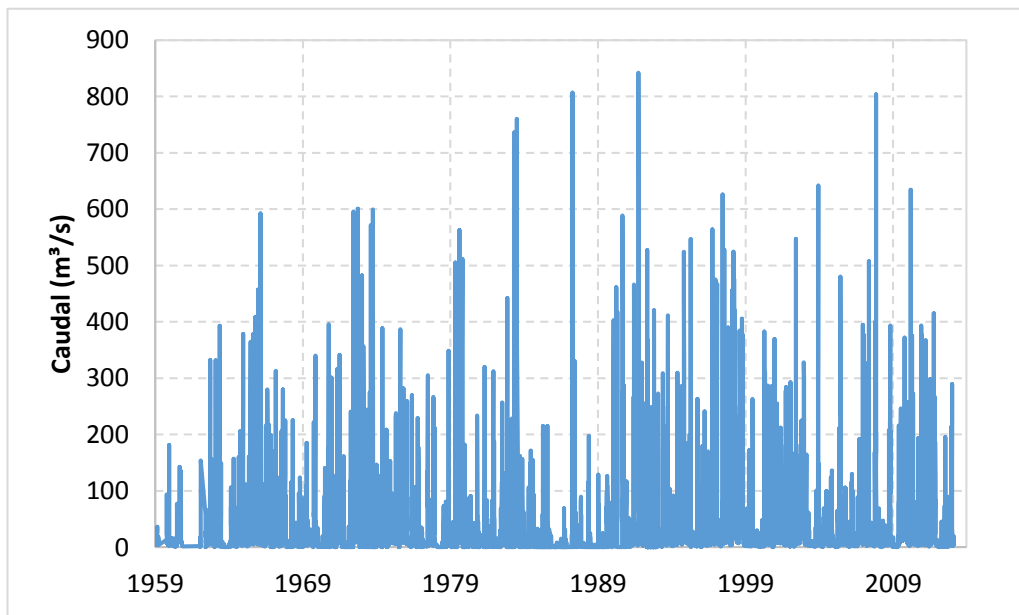
Figura 2.2.17. Estaciones de aforo (SSRH).

Río/Lugar	PARÁMETRO	AÑO													
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
CHIRIMAY-COLONIA LIEBIG	Aforos														
	Altura														
PARANAY-EL ALCAZAR	Aforos														
	Altura														
	Caudal Medio Diario														
	Caudal Medio Diario Max														
	Caudal Medio Diario Min														
	Caudal Medio Mensual														
	Precipitación														
PARANAY-PUENTE RUTA 12 VIEJA	QMax Instant														
	QMin Instant														
	Aforos														
	Altura														
PIRAY GUAZU-PINAR CIBA	Aforos														
	Altura														
	Caudal Medio Diario														
	Caudal Medio Diario Max														
	Caudal Medio Diario Min														
	Caudal Medio Mensual														
	Precipitación														
PIRAY GUAZU-FUENTE VIEJO	QMax Instant														
	QMin Instant														
	Aforos														
	Altura														
PIRAY MINI-VALLE HERMOSO	Caudal Medio Diario														
	Caudal Medio Diario Max														
	Caudal Medio Diario Min														
	Caudal Medio Mensual														
	Precipitación														
	QMax Instant														
	QMin Instant														
YABERRI-COLONIA MARTIRES	Aforos														
	Altura														
	Caudal Medio Diario Max														
	Caudal Medio Diario Min														
	Caudal Medio Mensual														
Precipitación															

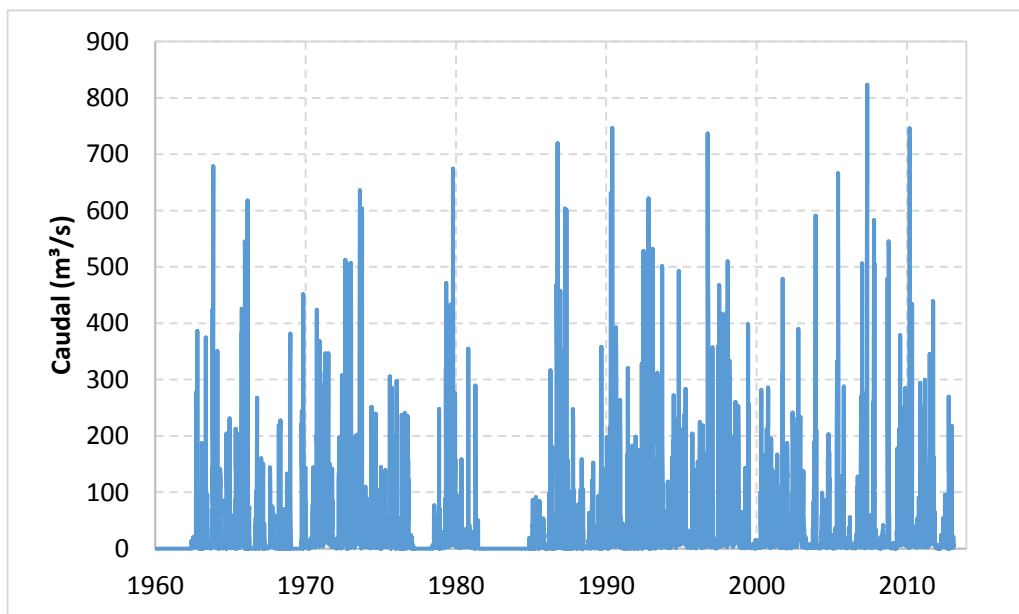
Figura 2.2.18. Ventanas de tiempo de los registros de caudal.



a) Estación Paranay – El Alcazar



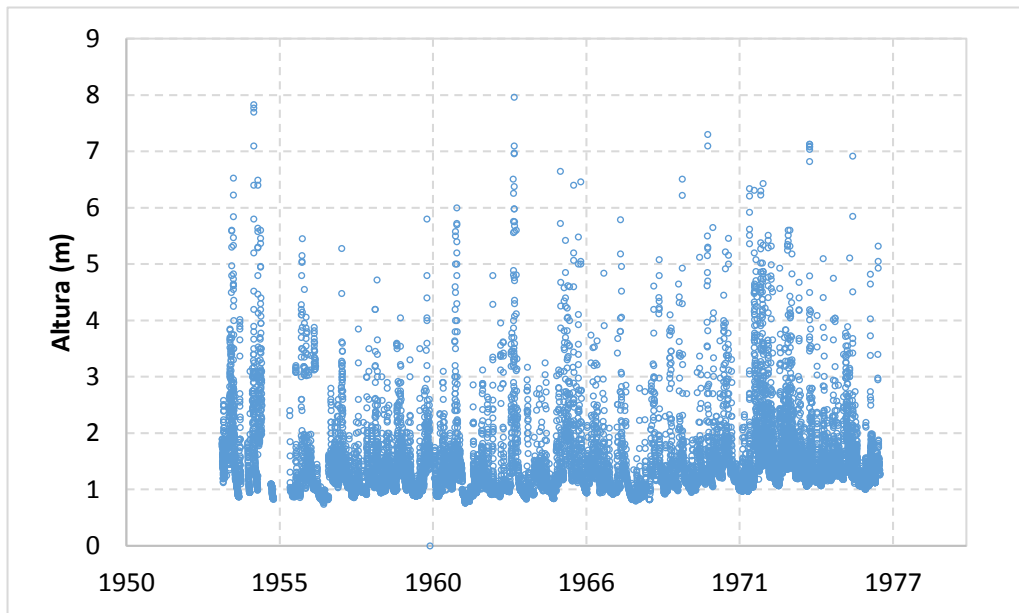
b) Estación Piray Guazú – Pinar Ciba



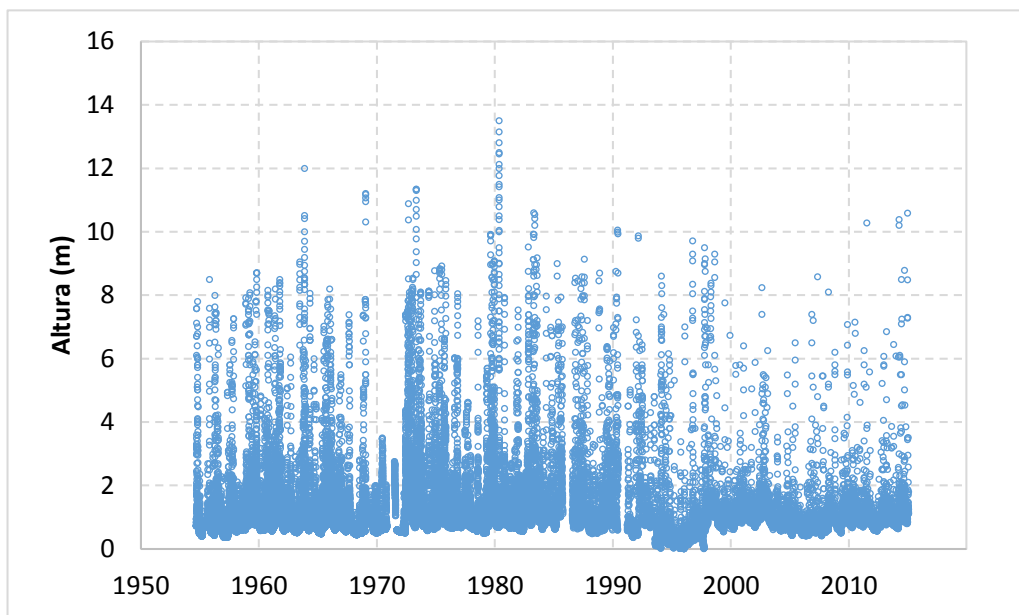
c) Estación Piray Miní – Valle Hermoso

Figura 2.2.19. Caudales diarios

Para las estaciones “Vieja RN12”, sobre el arroyo Paranay, y “Colonia Mártires”, sobre el arroyo Yabebiry, no se cuenta con registros de caudal diario, pero sí de niveles, los cuales se muestran en la Figura 2.2.20. En la Figura 2.2.21 se presentan los registros de aforos para esas dos estaciones, a los cuales se han ajustado curvas de modo de disponer de relaciones altura-caudal ($h-Q$) con las cuales convertir las series de nivel en series de caudal.

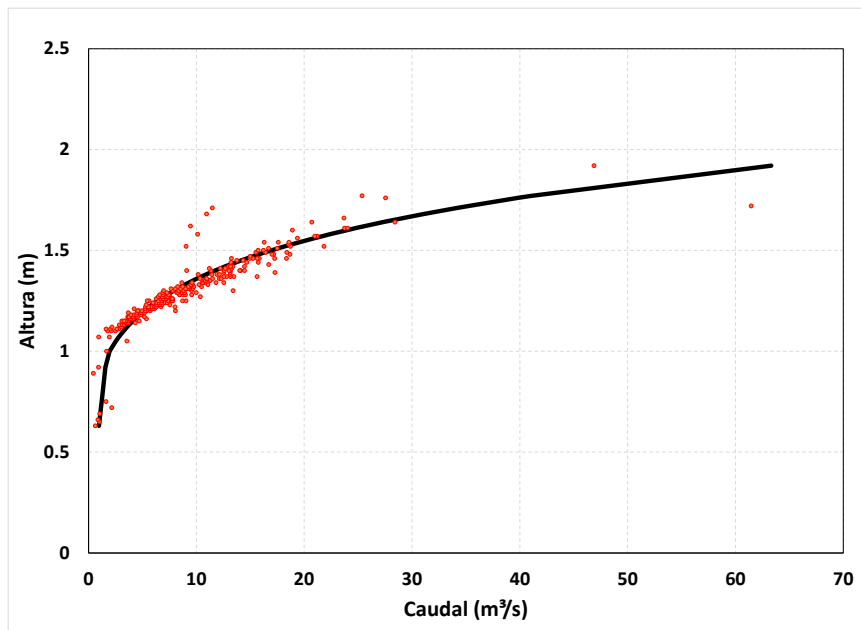


a) Arroyo Paranay en el Puente de la vieja RN12



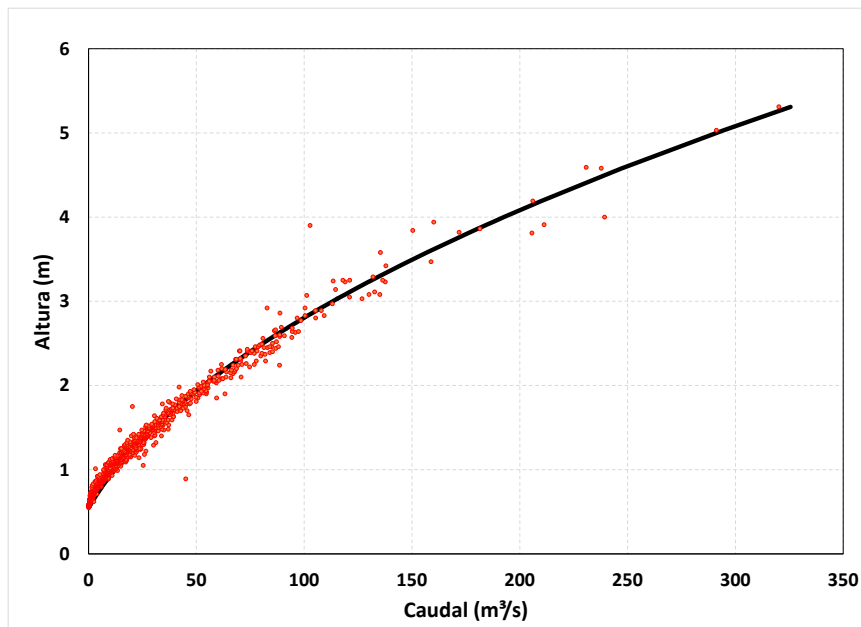
b) Arroyo Yabebiry en Colonia Mártires

Figura 2.2.20. Series de alturas hidrométricas



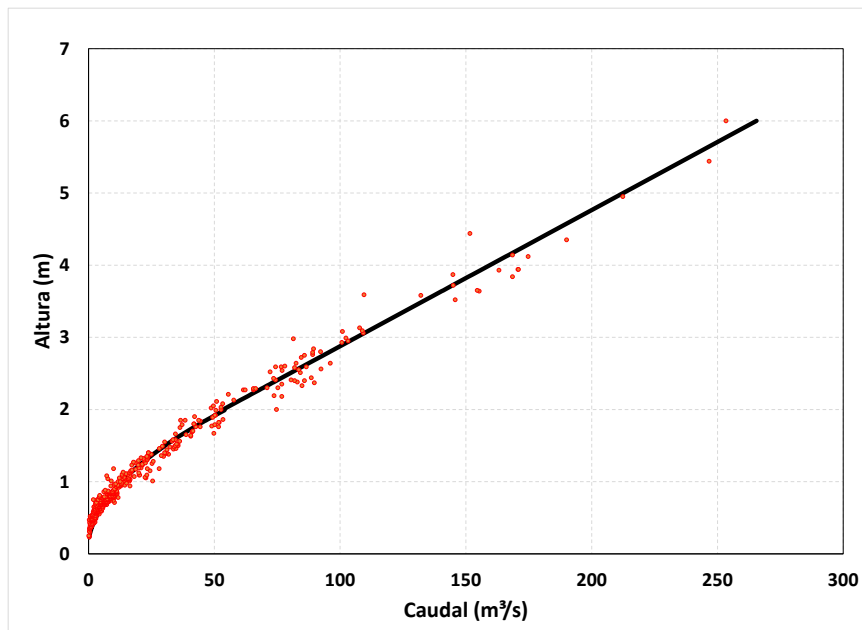
a) Arroyo Paranay en el Puente de la vieja RN12

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1\text{m} & Q = 2,051 \cdot h - 0,3254 \\ > 1\text{m} & Q = 1,9478 \cdot h^{5,3373} \end{cases}$$



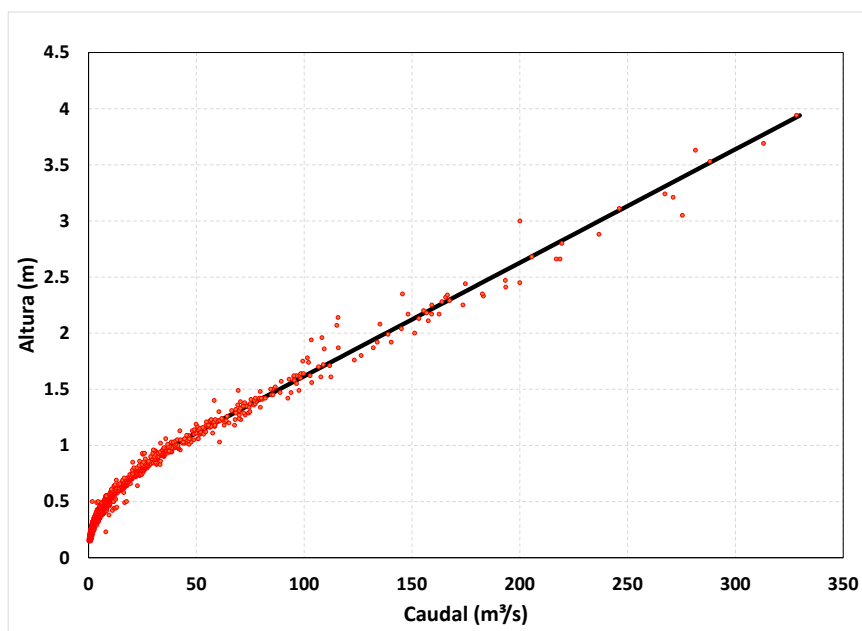
b) Arroyo Paranay en el Alcazar

$$Q = 9,6012 \cdot h^2 + 12,118 \cdot h - 9,5$$



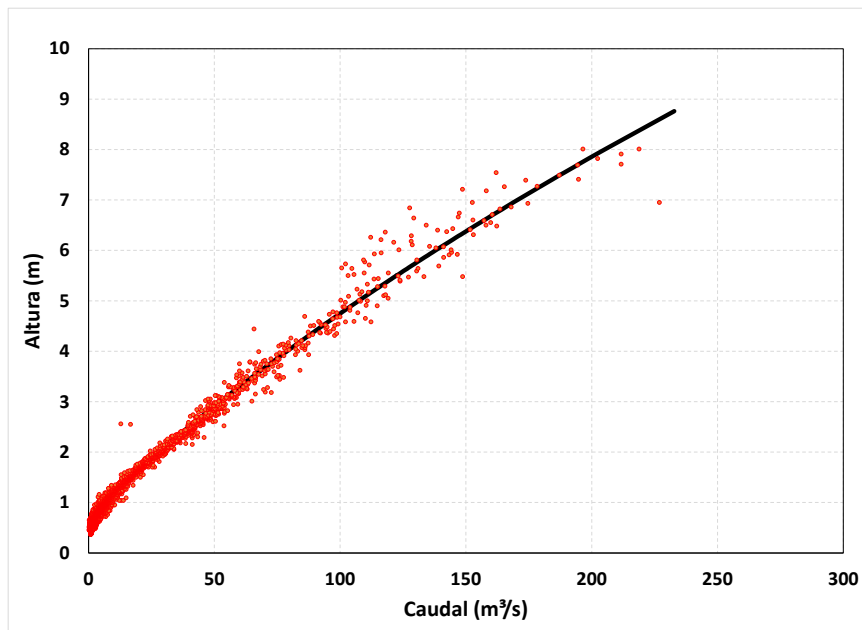
c) Arroyo Piray Mini en Valle Hermoso

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 2m \\ > 2m \end{cases} \quad \begin{cases} Q = 13,866 \cdot h^2 - 0,1741 \cdot h - 0,5 \\ Q = 53,004 \cdot h - 52,53 \end{cases}$$



d) Arroyo Piray Guazú en Pinar Ciba

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1m \\ > 1m \end{cases} \quad \begin{cases} Q = 41,472 \cdot h^{2,3731} \\ Q = 98,922 \cdot h - 59,924 \end{cases}$$



e) Arroyo Yabebiry en Colonia Mártires

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1,1\text{m} & Q = 5,7512 \cdot h^{2,7072} \\ > 1,1\text{m} & Q = 1,013 \cdot h^2 + 19.413 \cdot h - 15 \end{cases}$$

Figura 2.2.21. Relaciones altura-caudal

A partir de las series temporales de caudal se determinaron las curvas de excedencia de caudales en todas las estaciones, las cuales se presentan en la Figura 2.2.22. Se observa que las curvas son similares entre sí, alcanzando valores picos de 800 m³/s en Piray Mini y Piray Guazú, y poco más de 500 m³/s en el Paranay.

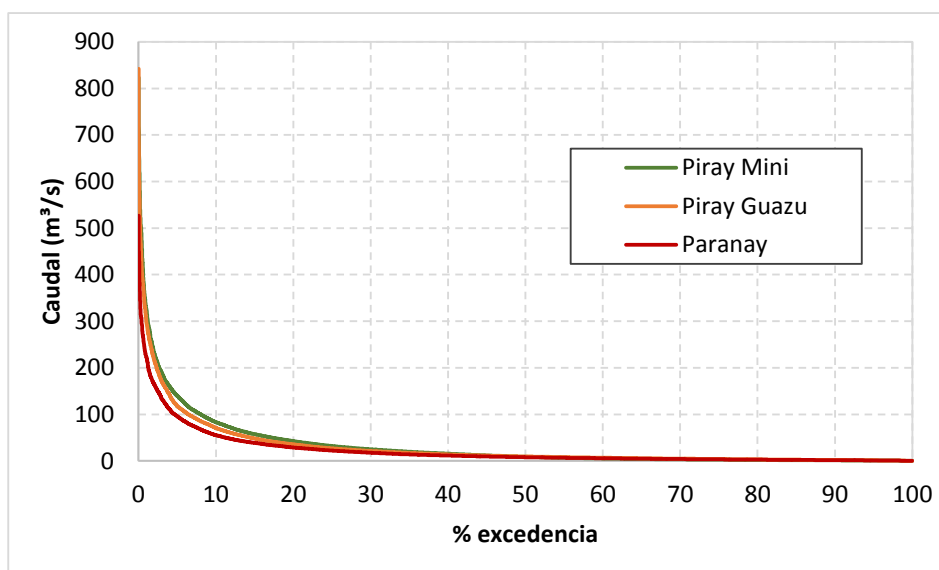


Figura 2.2.22. Curva de excedencia de caudales

2.3 SUELO

2.3.1 Usos del suelo

El Ministerio de Ecología y RNR de Misiones cuenta con un mapa detallado de áreas naturales protegidas (Figura 2.3.1). Se diferencian tres grupos:

- Áreas Naturales Protegidas
- Corredores verdes
- Ruta costera

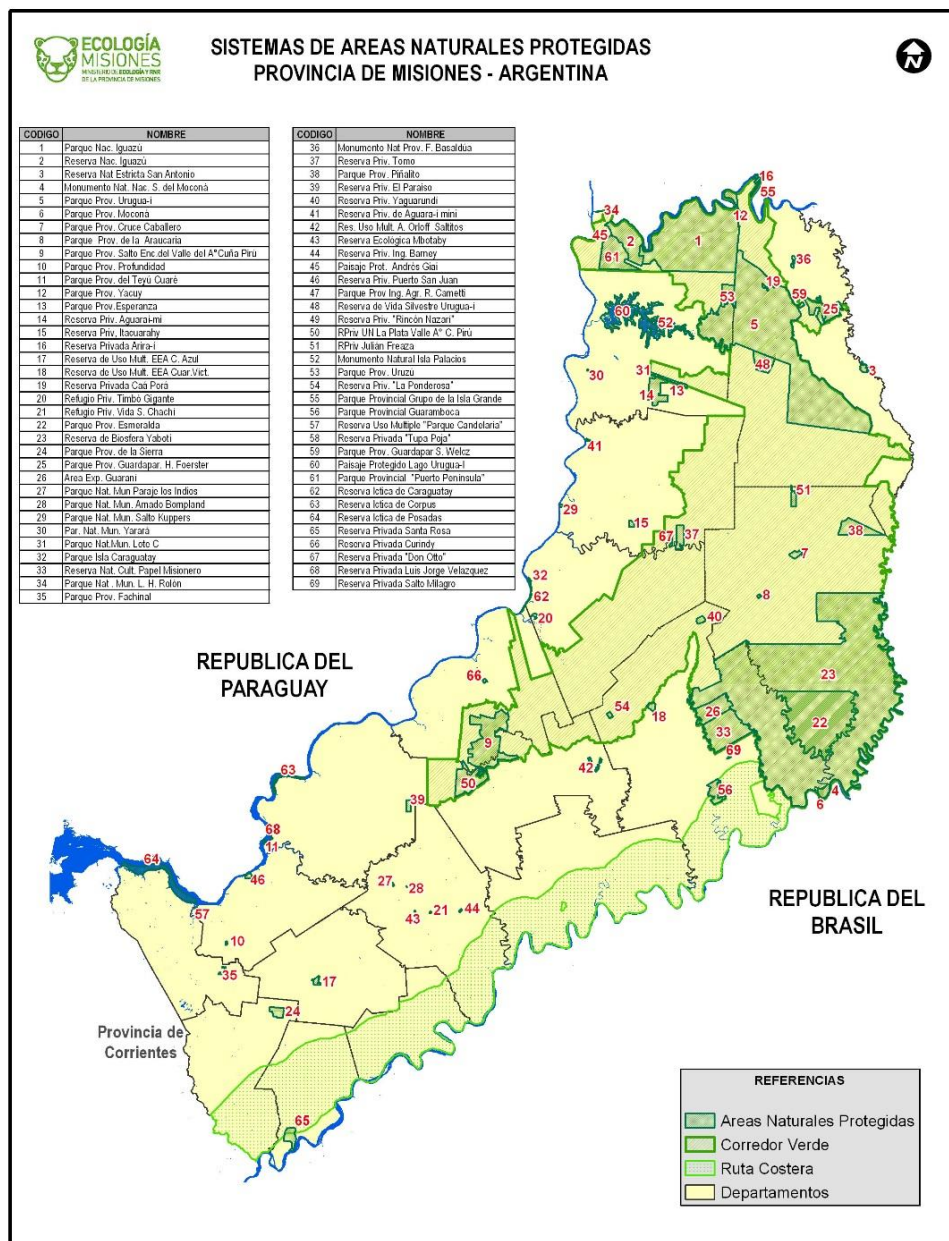


Figura 2.3.1. Mapa de áreas protegidas de la Provincia de Misiones (Fuente: Ministerio de Ecología y RNR de Misiones)

En la Figura 2.3.2 se superponen las áreas naturales con las cuencas. Se observa que:

- Todas las cuencas que desembocan en el río Uruguay tienen áreas naturales en la zona baja; según el mapa de la Figura 2.3.1 son parte del corredor denominado Ruta Costera.
- Gran parte de la zona centro-este de la provincia está catalogada como corredores verdes o áreas protegidas. En particular, las cuencas del Yaboty (7), La liana (30) y Toro (42) constituyen áreas protegidas de la Biosfera Yaboty.
- Los corredores verdes afectan gran parte de la zona alta de las cuencas Paranay Guazu (2), Piray Guazu (3) y Piray Mini (4).
- La cuenca del Yabebiry no se encuentra comprendida dentro de áreas naturales (con excepción de parque provinciales menores de poca extensión, como el Teyucuaré, a orillas del Paraná).
- En el norte de la provincia también se tienen Áreas Naturales Protegidas en las cuencas que desembocan sobre el río Iguazú, o en la zona alta de la cuenca del Urugua-í (5).

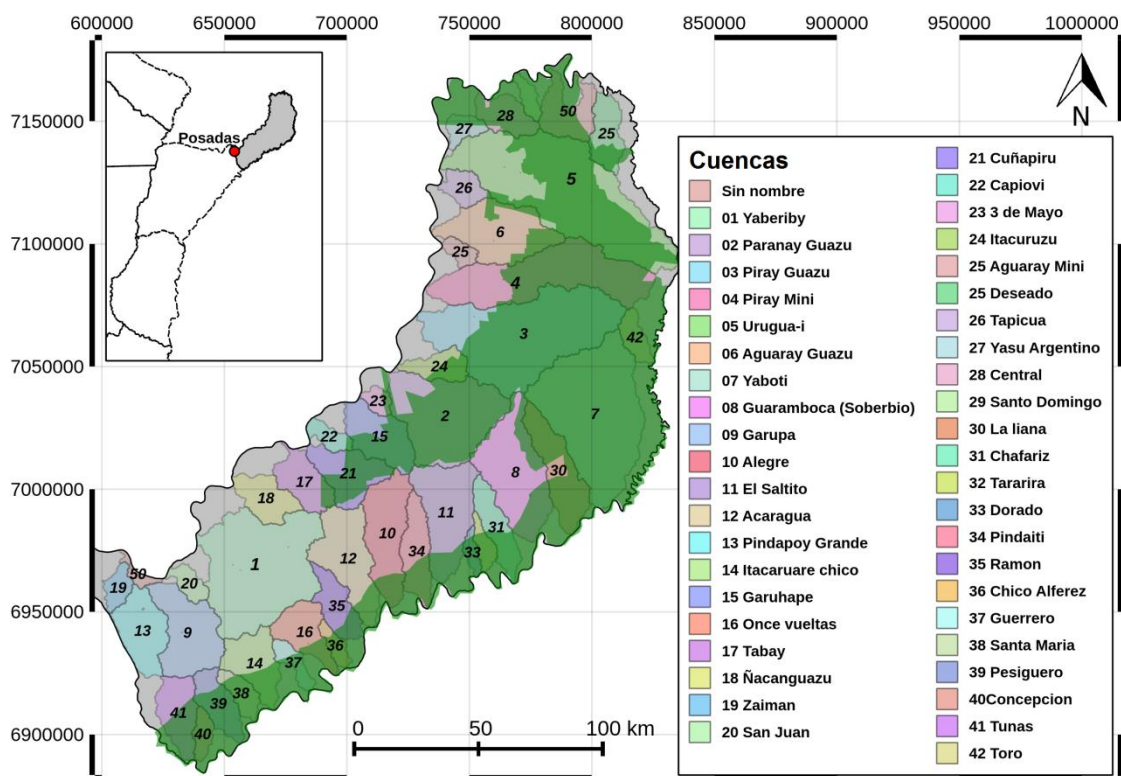


Figura 2.3.2. Superposición de cuencas y áreas naturales

El INTA ha confeccionado un mapa de aptitud de las tierras (Figura 2.3.3), donde se observa que poco más del 60% del territorio es apto para la forestación, siendo el resto apto para fines agrícolas o pastoreo.

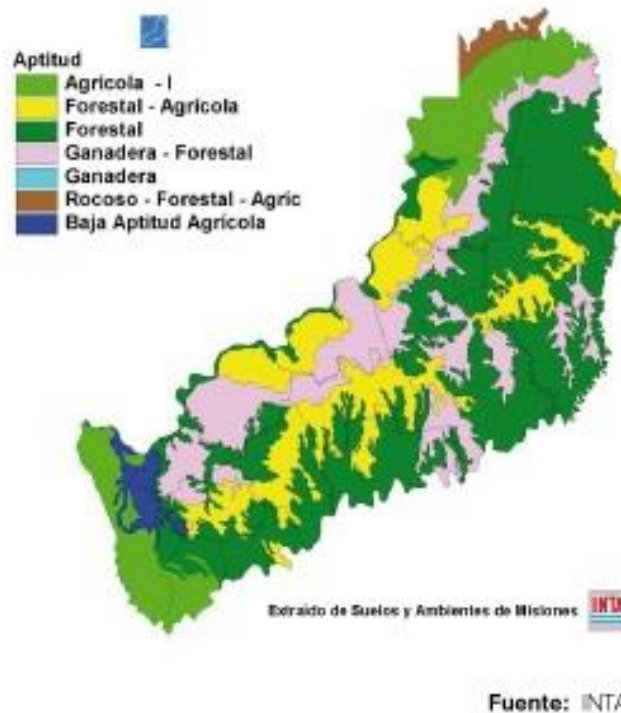


Figura 2.3.3. Aptitud de las tierras para usos agrícolas (INTA, 2011)

Para el análisis de los usos del suelo en el área de estudio se contó con la base de datos del Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA). En su plataforma web, están registradas series temporales de áreas implantadas a paso anual, en el período 1969-2013, para distintos tipos de cultivos. Dichas series están discriminadas por departamentos o bien para la totalidad de la Provincia de Misiones.

Se tomaron las series de áreas implantadas para la totalidad de la provincia, con el objetivo de identificar aquellos cultivos de mayor incidencia, evitando así trabajar con un volumen de datos demasiado grande con cultivos que no repercuten sensiblemente en el resultado del análisis. Se seleccionaron los 5 cultivos de mayor área implantada: yerba mate, té, maíz, soja y tung, aunque estos dos últimos hayan decrecido considerablemente en los últimos años. De la Figura 2.3.4 se observa que, efectivamente, el resto de los cultivos representa un área muy pequeña en comparación, sin superar las 10000 ha, por lo que se desprecia en el análisis.

De la web del SIIA también se obtuvieron las series temporales de los cultivos dominantes discriminadas para cada uno de los 17 departamentos. Estas series presentan datos faltantes en los años 2004, 2005, 2008 y 2010 en todos los casos, y en años posteriores según el tipo de cultivo, los cuales fueron completados por interpolación lineal con los datos de los años más próximos. Posteriormente se pasó la información por departamentos a una discriminada por cuenca a través de una metodología de ponderación por área de intersección entre ambas (Figura 2.3.5).

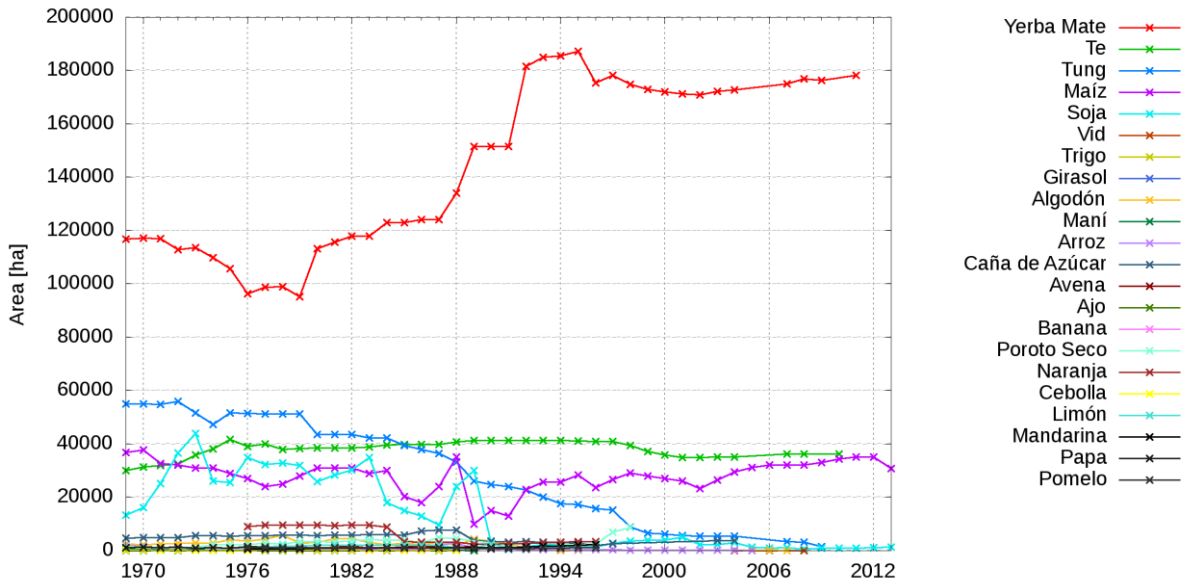


Figura 2.3.4. Área implantada en la provincia de Misiones según tipo de cultivo.

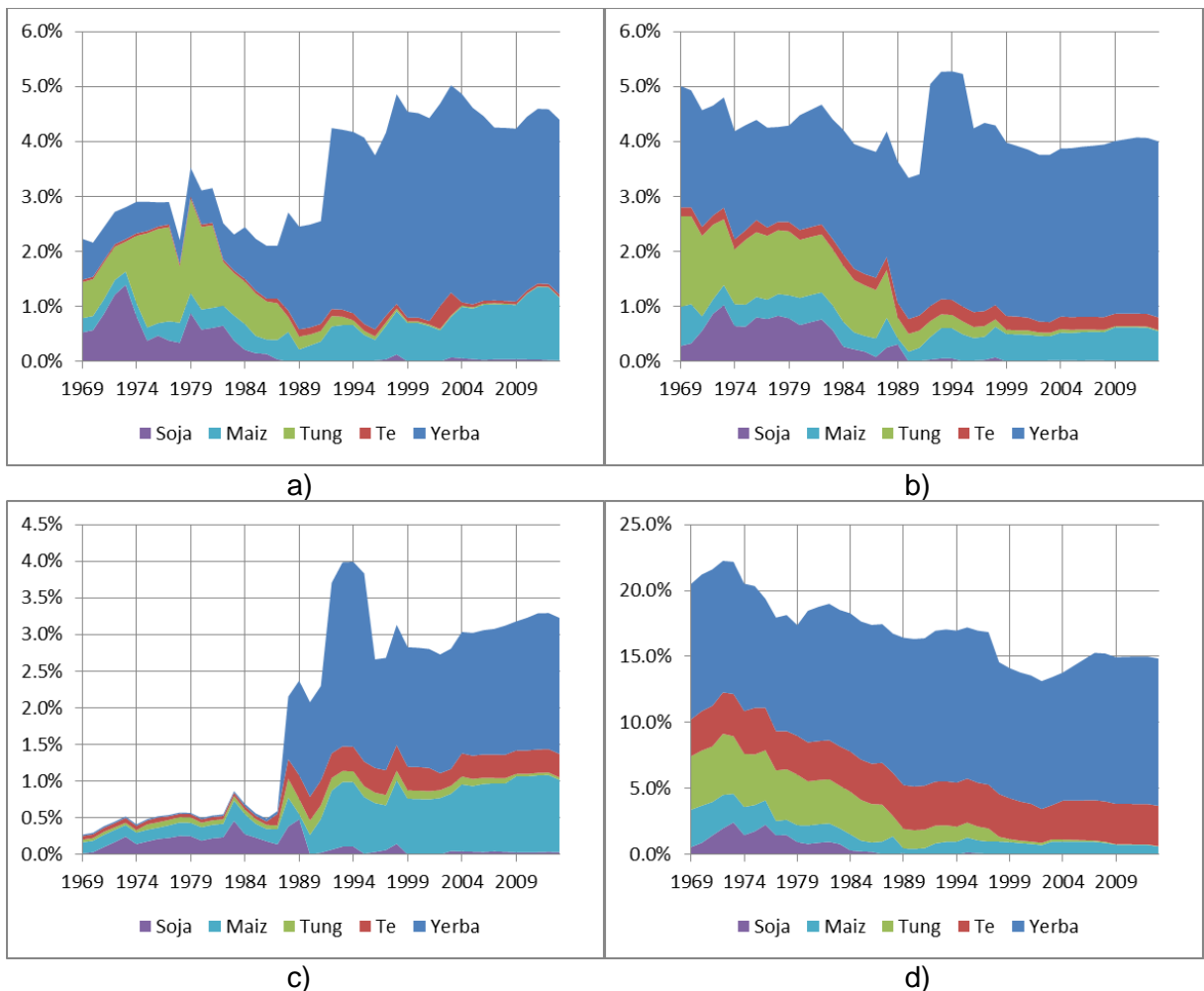


Figura 2.3.5. Área implantada en la Provincia de Misiones según tipo de cultivo para las cuencas Urugua-i (a), Piray-guazú (b), Yaboti (c) y Yarebiry (d).

En la Figura 2.3.6 se presentan los resultados agrupados espacialmente para el año 2007 (el año más reciente con datos completos no interpolados), donde se observa que en la gran mayoría de las cuencas el cultivo predominante es la yerba mate, y que aquella con mayor área cultivada es Yabebiry. Además, los cultivos de té y soja se concentran en la zona central de la provincia.

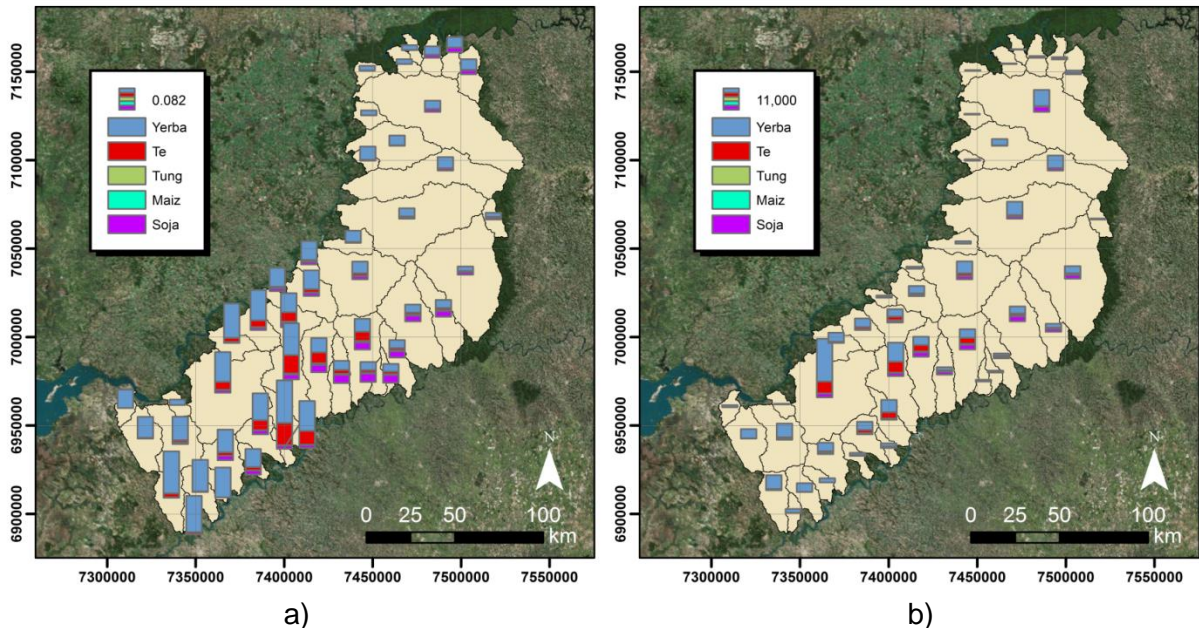


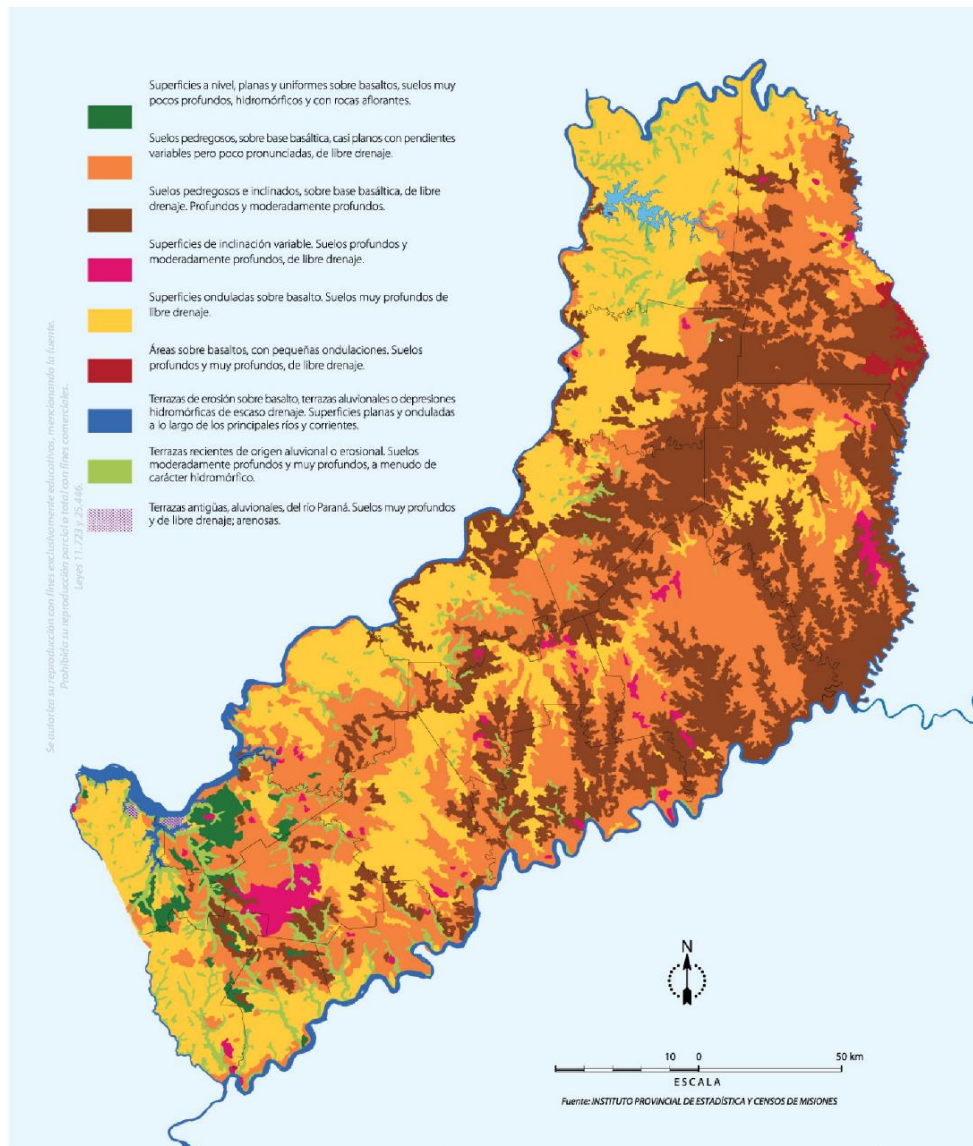
Figura 2.3.6. Área implantada en la Provincia de Misiones según tipo de cultivo. En valores relativos al área de cuenca (a) y valores absolutos (b).

2.3.2 Tipos de suelo

La Figura 2.3.8 muestra la caracterización de los suelos de la provincia. Son preponderantes los suelos pedregosos sobre base basáltica, variando su inclinación desde pronunciada (marrón), pasando por pendientes poco pronunciadas (naranja), y hasta superficies onduladas (amarillo). En casi toda la extensión provincial los suelos se caracterizan por ser de libre drenaje.

2.3.3 Erosibilidad

La Figura 2.3.9 muestra que la mayor parte del territorio presenta un potencial de erosión hídrica entre moderadamente alto a extremadamente alto.



GRAN ATLAS DE MISIONES

PÁGINA
25

Figura 2.3.8. Tipos de suelos de la Provincia de Misiones (Fuente: Ministerio de Ecología y RNR de Misiones)

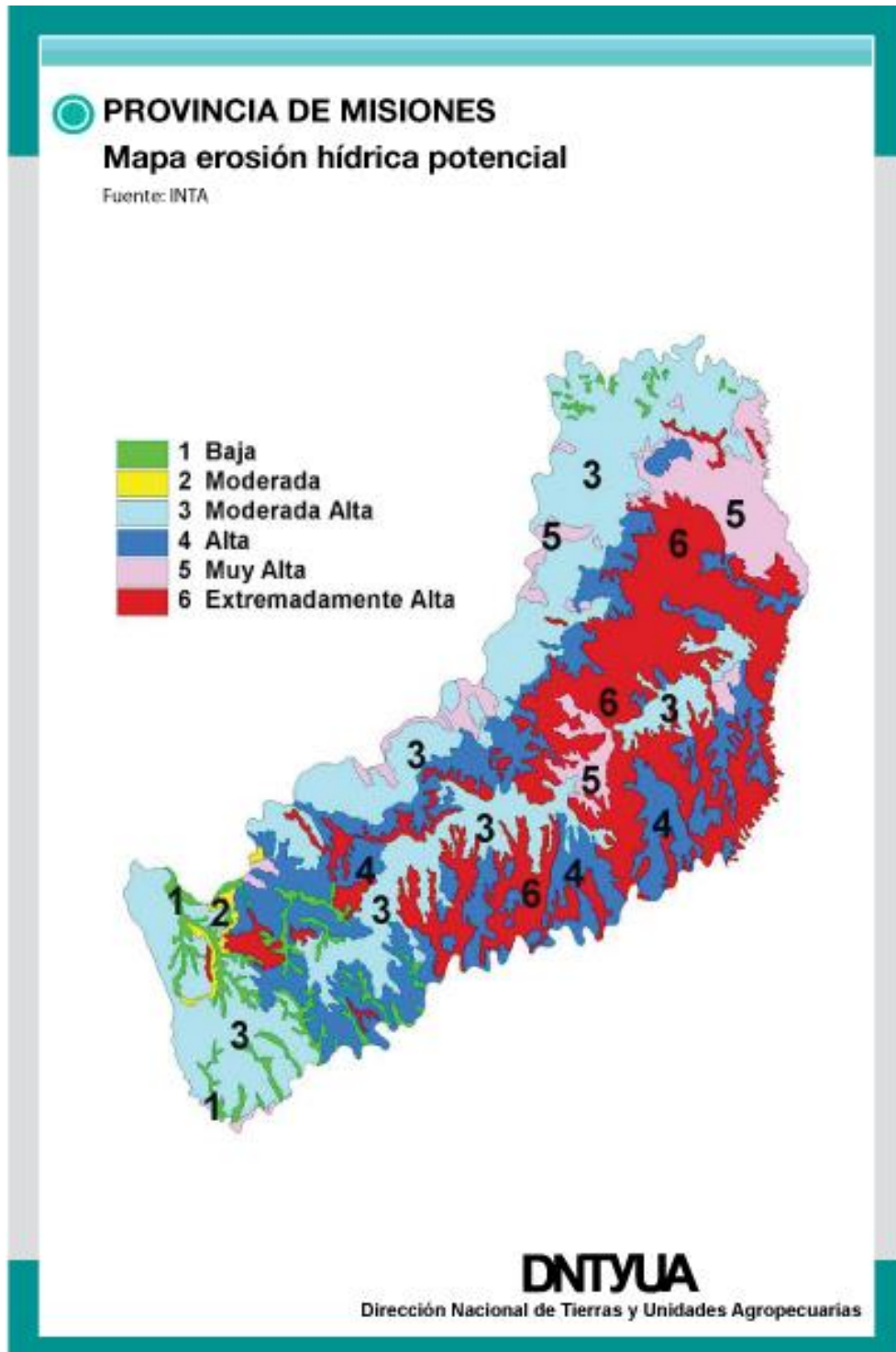


Figura 2.3.9. Erosión hídrica potencial de la Provincia de Misiones (Fuente: Dirección Nacional de Tierras y Unidades Agropecuarias)

2.4 APROVECHAMIENTOS EXISTENTES Y PROYECTADOS

En la Figura 2.4.1 se ubican los micro-aprovechamientos hidroeléctricos existentes en la Provincia de Misiones, 7 en total, a saber:

- Aprovechamiento Arroyo Central
- Aprovechamiento El Taruma (hidroeléctrico)
- Aprovechamiento Salto Pereyra
- Aprovechamiento Persiguero
- Aprovechamiento el Tigre (hidroeléctrico, Potencia instalada: 250kW)
- Aprovechamiento Dorado
- Aprovechamiento Salto Carlitos



Figura 2.4.1. Aprovechamientos en la Provincia de Misiones (Fuente: Gobierno de la Provincia de Misiones)

En lo que respecta a aprovechamientos hidroeléctricos, la Secretaría de Energía indica 3 centrales (Figura 2.4.2):

- Urugua-I
- El Salto I
- El Salto II

Los dos últimos se encuentran dentro de la categoría de pequeños aprovechamientos, y son operados desde 1996 por Energía Misiones SA (EMSA)⁷. Además, se identifica un pequeño aprovechamiento en la cuenca del Yabebiry (Figura 2.4.2).

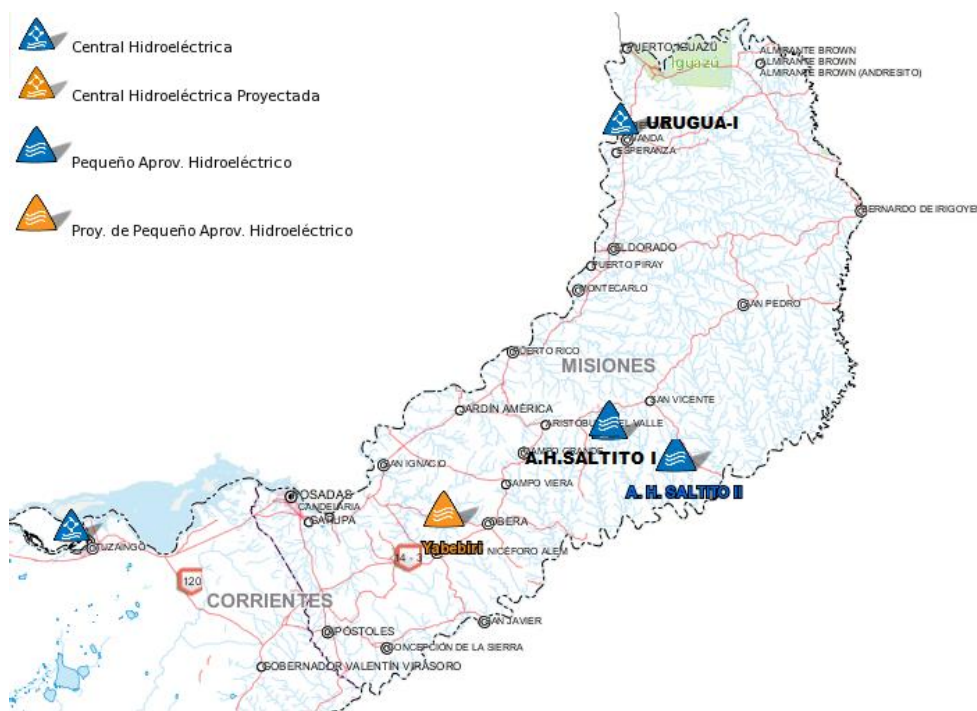


Figura 2.4.2. Aprovechamientos hidroeléctricos (Fuente: Secretaría de Energía)

En un antiguo estudio llevado a cabo por la COMIP⁸ se identificaron 44 aprovechamientos con un Potencial Hidroeléctrico Teórico (PHT) menor a 5 MW, y 10 con una potencia superior a 5 MW. Para los aprovechamientos identificados se realizó un análisis sobre el grado de factibilidad económica, determinándose que para que un aprovechamiento fuera posible la potencia instalada debía ser mayor a 11 MW.

⁷ Informe 2001-2005. Secretaría de Energía

(http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/mercado_electrico/inf_sec_elect_01_05_Q.pdf)

⁸ Aprovechamiento del Río Paraná en el Tramo Límite Comprendido por la Desembocadura del Río Iguazú y la sección Encarnación-Posadas con particular atención a la Zona de Corpus (1975), Tomo 5, Capítulo XI: Otros Aprovechamientos

En el contexto actual de Yacyretá operando y Corpus sin construir, los aprovechamientos que resultan económicamente factibles, entre los identificados en aquella oportunidad, serían los que se presentan en la Tabla 2.4.1, donde se indican sus respectivas potencias instaladas, y cuya ubicación se muestra en la Figura 2.4.3. Solo el aprovechamiento de Urugua-í fue construido y está operando actualmente.

Tabla 2.4.1. Potencia de aprovechamientos económicamente factibles estudiados por COMIP

Aprovechamiento	Potencia instalada (MW)		
	Base	Media	Punta
Urugua-í	30,2	76,8	108,0
Piray Guazú	20,1	50,5	70,3
Paranay Guazú	8,2	20,5	28,7
Ita Curuzú	6,1	15,3	21,4

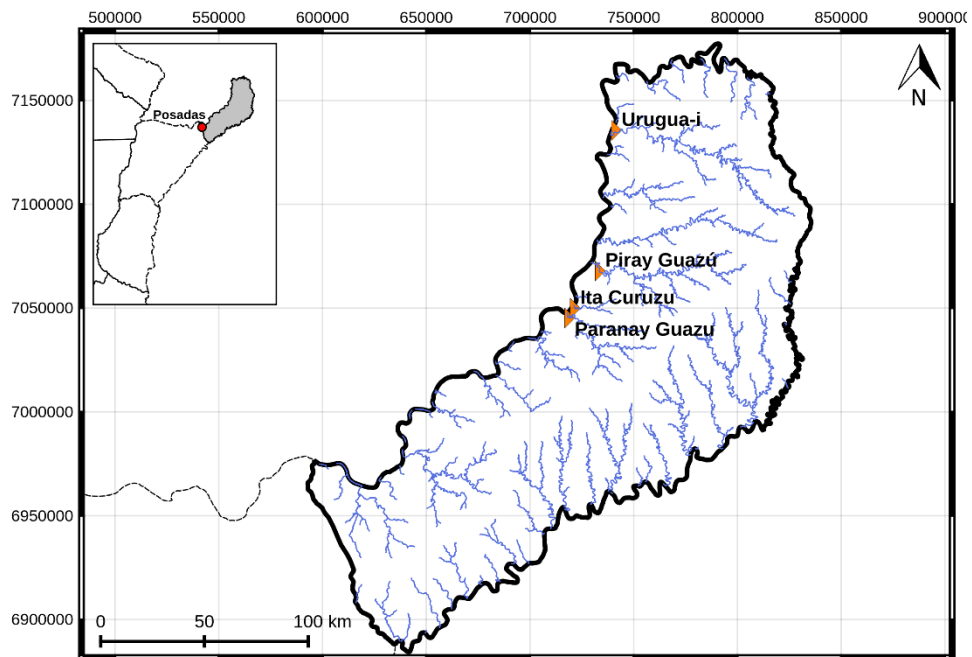


Figura 2.4.3. Aprovechamientos factibles

3 MODELO HIDROLOGICO

3.1 Metodología

Para llevar a cabo un balance hídrico completo es necesario recurrir a la modelación hidrológica de la cuenca.

Se ha encarado la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE). Este software está diseñado para simular el proceso hidrológico completo de sistemas dendríticos. Incluye procedimientos de análisis hidrológicos tradicionales, tales como infiltración por eventos, hidrograma unitario y traslado hidrológico. También contiene procedimientos para simulación continua, incluyendo evapotranspiración, fusión de nieve, y control de humedad del suelo.

Para el preprocesamiento de los datos se ha utilizado el software HEC-GeoHMS. Es una extensión del software ArcGIS que contiene una serie de procedimientos, herramientas y utilidades para la preparación de los datos desde un sistema de información geográfica. Permite visualizar y realizar análisis espaciales, obtener las características de la cuenca, delinear cauces y cuencas, y finalmente construir las entradas para el HEC-HMS.

3.2 Preprocesamiento hidrológico

El preprocesamiento hidrológico apunta a establecer las cuencas y la red de drenaje asociada. Procede a través de los siguientes pasos:

- Selección del MDE del terreno
- Relleno de vacíos
- Dirección del flujo
- Acumulación del flujo
- Definición de cauces
- Segmentación de cauces
- Delineación de subcuencas

La información se genera en formato *grid* (celda o raster) o en formato *shape* (vector: puntos, líneas o polígonos).

3.2.1 Selección del MDE del terreno

El IGN desarrolló una línea de producción para generar de un MDE para la República Argentina.

La información de base es el MDE satelital proveniente de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que fue realizada en el transcurso del mes de febrero del año 2000. Esta misión fue un trabajo conjunto de la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos de Norte América y las Agencias Espaciales de Alemania e Italia. La técnica utilizada fue la interferometría RADAR desde el espacio. Todos los datos son de libre distribución, y tienen una resolución de 30 metros por píxel para el territorio de los Estados Unidos, y de 90 metros, para el resto del mundo.

A través de un convenio con la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos de Norte América, el IGN recibió el modelo de Argentina con resolución de 30 metros por píxel. A partir de este modelo derivó a otro de 45 metros por píxel, al que se le aplicaron los siguientes procesos: relleno de vacíos, inclusión de datos de lagos, filtrado espacial y enmascarado de límites⁹. Este fue denominado SRTM-AR, tal como se indicó en la sección 2.1.3.

Para el presente proyecto se tomó el SRTM-AR para la totalidad de la Provincia de Misiones y se le efectuó un cambio en la resolución de la grilla a 180 metros, mediante un remuestreo de la información, de modo de disminuir la cantidad de datos (en un factor 16), lo cual permite un manejo más eficiente de la información sin perder precisión a los fines buscados. El MDE resultante, proyectado a Gauss – Kruegger Faja 7 (Marco de referencia: Posgar 2008), se grafica en la Figura 3.2.1.

3.2.2 Relleno de Vacíos

El MDE se procesó de manera tal que no queden depresiones en el terreno. Este procesamiento se efectúa rellenando las depresiones, o sea, aumentando las cotas de las celdas que estén rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta forma el agua puede circular de una celda a otra sin estancarse. Este MDE “hidrológicamente corregido” (Figura 3.2.2) se tomó como punto de partida para delinear las cuencas y los cauces.

⁹ <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>

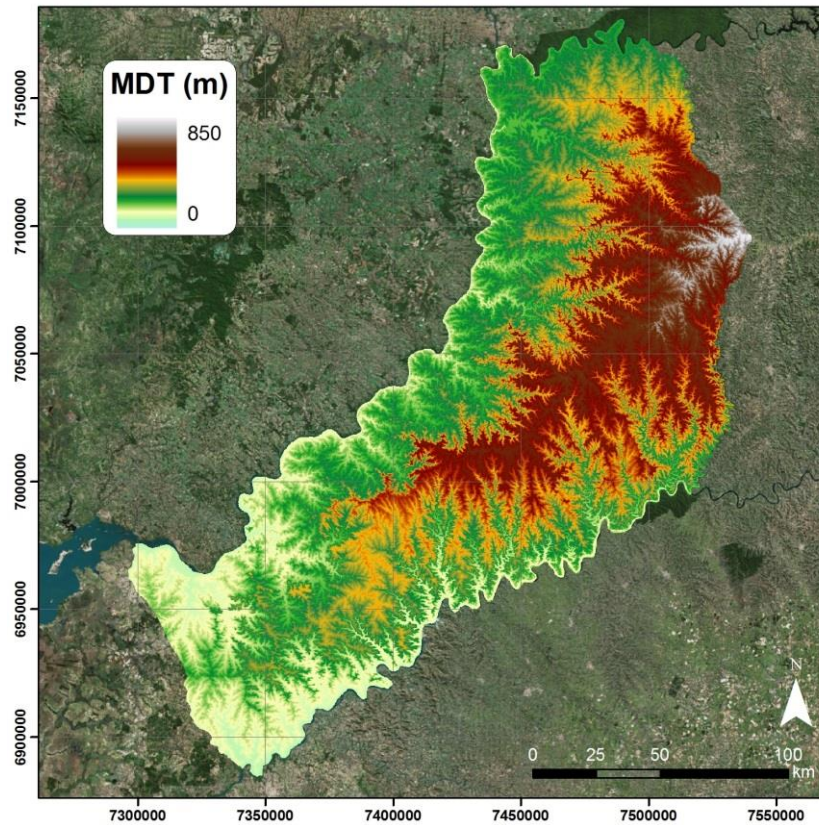


Figura 3.2.1. MDE del Terreno

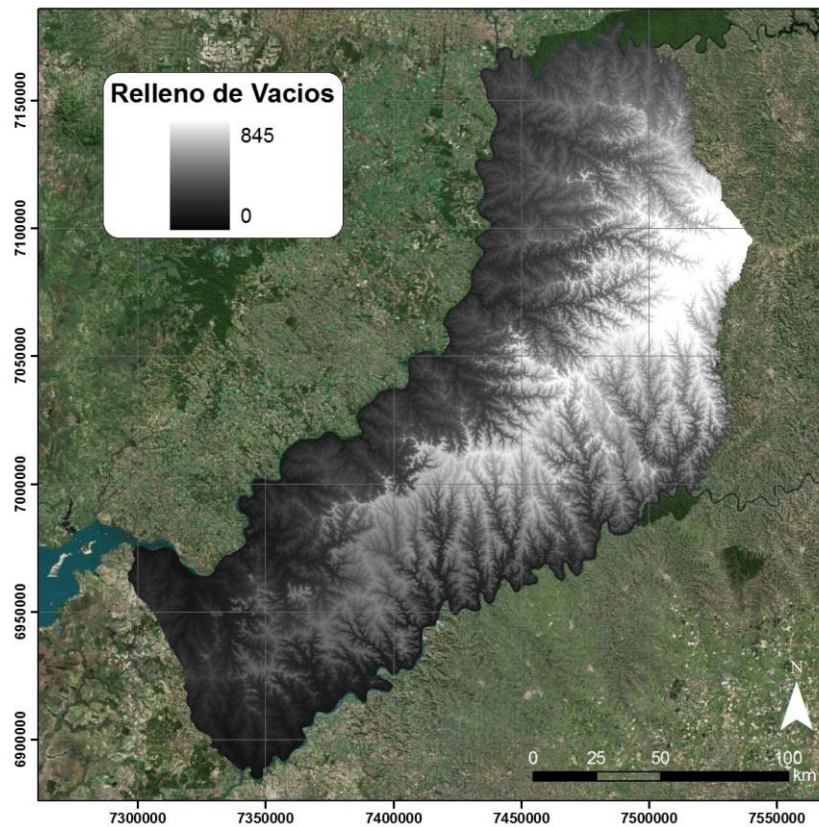


Figura 3.2.2. MDE hidrológicamente corregido

3.2.3 Dirección del flujo

En este paso se definen las direcciones de máxima pendiente, considerando celda a celda las cotas de las celdas circundantes. Para ello se utiliza el MDE hidrológicamente corregido. Las ocho posibles direcciones del flujo se indican en la Tabla 3.2.1. Las direcciones de flujo resultantes para el presente problema se muestran en la Figura 3.2.3.

Tabla 3.2.1. Dirección del flujo

Numeración	Dirección
1	Este
2	Sudeste
4	Sur
8	Sudoeste
16	Oeste
32	Noroeste
64	Norte
128	Noreste

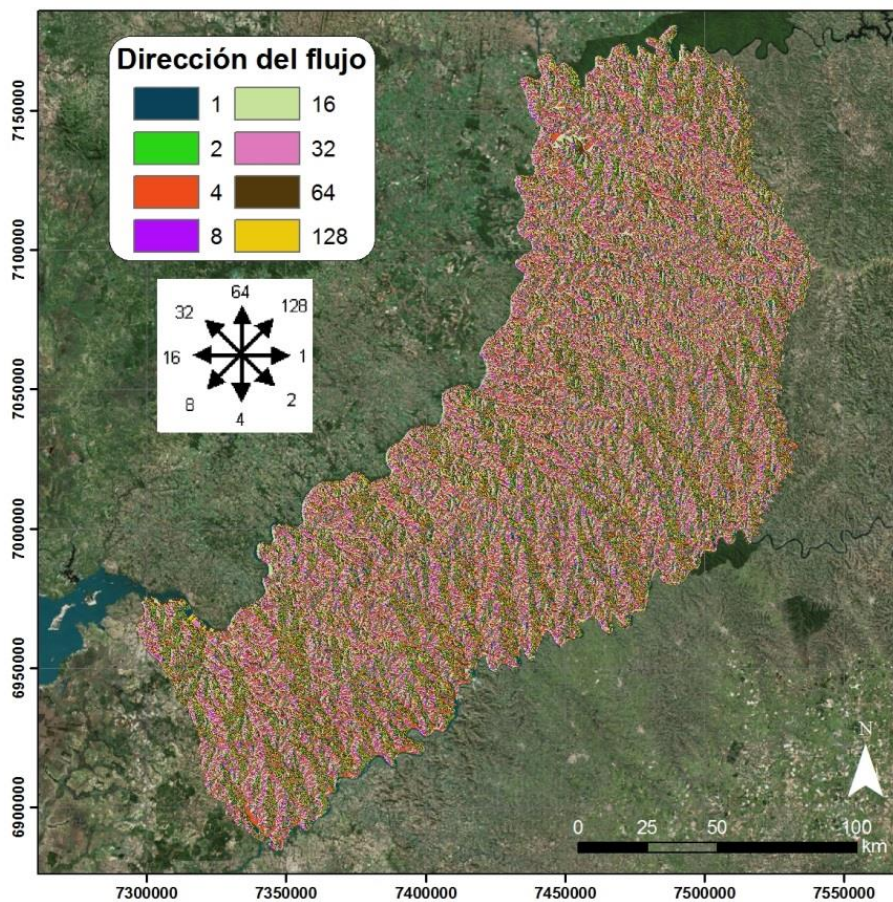


Figura 3.2.3. Direcciones de flujo

3.2.4 Acumulación del flujo

En este paso se determina el número de celdas de aguas arriba que drenan a cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo de ella. La acumulación de flujo es una medida del área de drenaje, expresada en unidades de celdas, que puede ser pasada fácilmente a m^2 o km^2 multiplicando el número de celdas por el tamaño de la celda del modelo. En la Figura 3.2.4 se observa la acumulación de flujo para el presente problema.

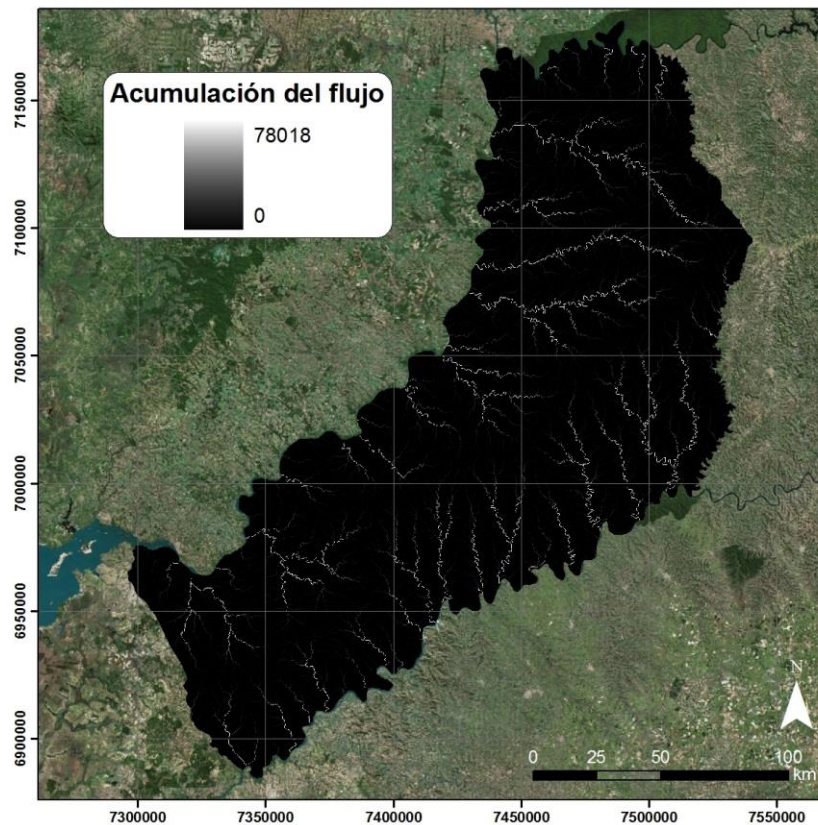


Figura 3.2.4. Acumulación de flujo

3.2.5 Definición de cauces

En este paso se califica como pertenecientes al cauce a aquellas celdas con flujo procedente de una cantidad de celdas mayor a un umbral definido por el usuario. El umbral puede especificarse como área o cantidad de celdas. Todas las celdas que tengan un valor superior al valor umbral serán clasificadas como celdas que forman parte del cauce, mientras que las restantes celdas serán consideradas como superficie del terreno que drena a los cauces definidos. Cuanto menor sea el umbral, mayor será el número de cauces generados.

Para el presente problema se ha seleccionado como umbral 3000 celdas, valor que permite representar los principales cauces de la Provincia.

3.2.6 Segmentación de cauces

En este paso se identifican segmentos de cauces. Los segmentos son tramos de cauces formados por el punto de inicio de un cauce y una unión, por dos uniones o por una unión y el punto final del cauce. A todas las celdas que formen parte de un mismo segmento se les asignará el mismo número.

La Figura 3.2.5 ilustra la segmentación para la cuenca Piray Guazú. En la Tabla 3.2.2 se observa la cantidad de segmentos obtenidos en función de diferentes umbrales. Para el umbral de 3000 celdas corresponden 117 segmentos.

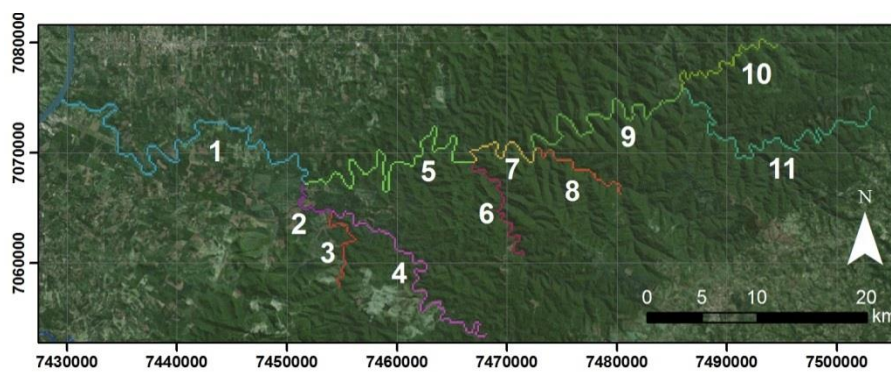


Figura 3.2.5. Segmentación de cauces

Tabla 3.2.2. Segmentos en función de un umbral

Umbral (cantidad de celdas)	Cantidad de segmentos
1000	425
2000	211
3000	117
4000	95
5000	73

3.2.7 Delineación de cuencas

Finalmente se define una cuenca por cada segmento de cauce. Las 117 cuencas resultantes para el presente problema se muestran en la Figura 3.2.6.

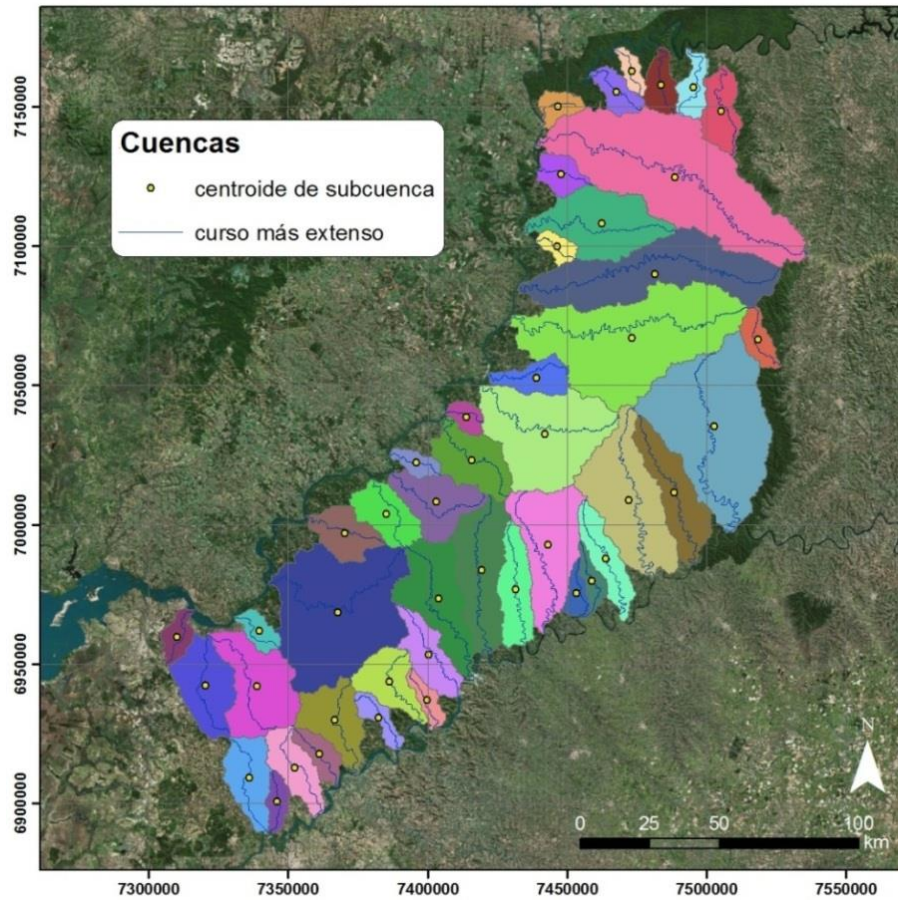


Figura 3.2.6. Delineación de cuencas

3.3 Esquematización

3.3.1 Cuencas

Para la representación en el modelo HEC-HMS se han fusionado cuencas, de modo de que ninguna tenga un área menor a 100 km². En la Figura 3.3.1 se muestran las 45 cuencas resultantes.

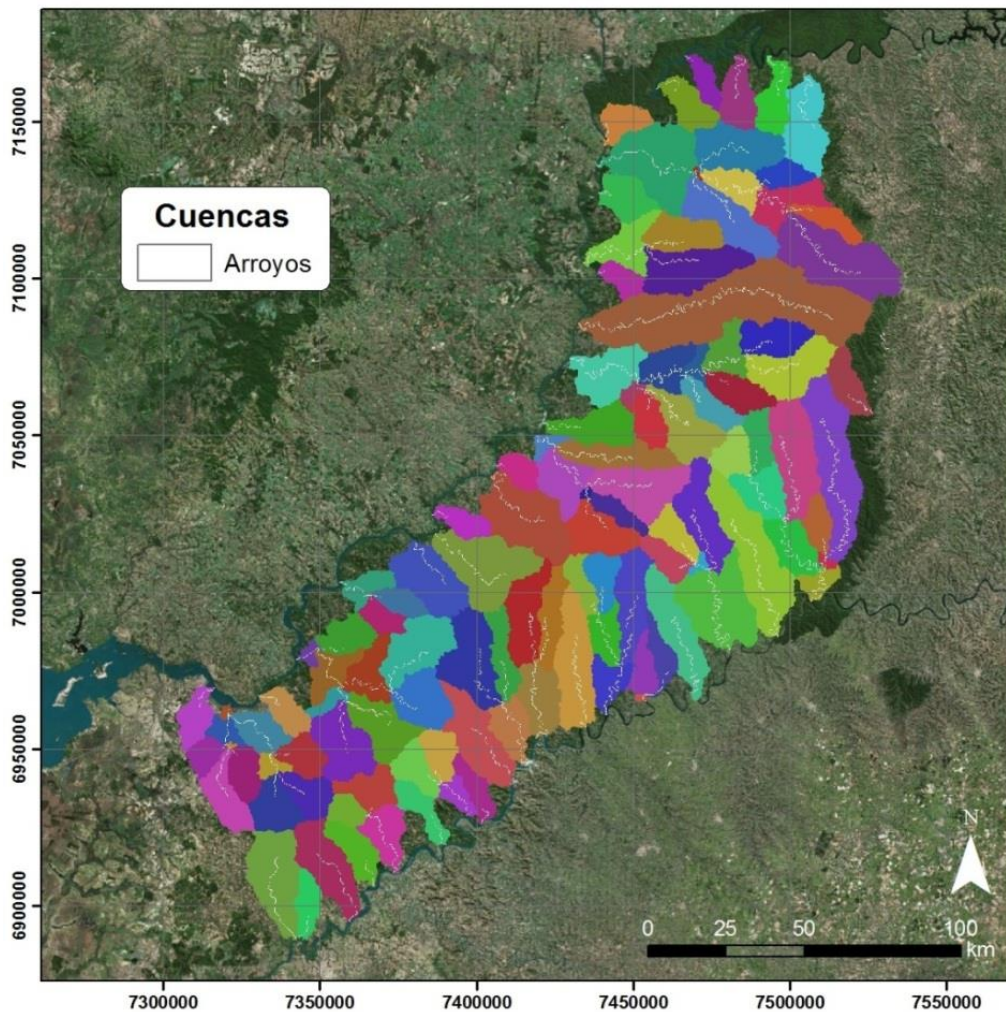


Figura 3.3.1. Cuencas de cálculo

HEC-GeoHMS calcula varias características topográficas de los cauces y cuencas. Estas características son útiles para comparar cuencas entre sí y estimar parámetros hidrológicos. Las características físicas de la cuenca y los cauces se almacenan en tabla de atributos.

Se determinaron el área y la ubicación del centroide de las subcuencas, la longitud de los cauces más extensos (Figura 3.3.2) y la pendiente media de dichos cauces. La pendiente media (*Pend*) se calculó utilizando la longitud del cauce más extenso y la diferencia entre las cotas de aguas arriba y aguas abajo de dicho cauce. También se efectuó el cálculo de la pendiente media a través de la formulación de Benson¹⁰, donde la pendiente media puede asimilarse a través de la pendiente de la recta trazada entre los puntos que se encuentran al 85% y al 10% de distancia a partir del punto de desagüe siguiendo el curso principal (*Pend**). Esta última es significativamente menor. Los resultados se muestran en la Tabla 3.3.1.

¹⁰ Benson, M.A. 1959. En Llamas, J. 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, 635 p.

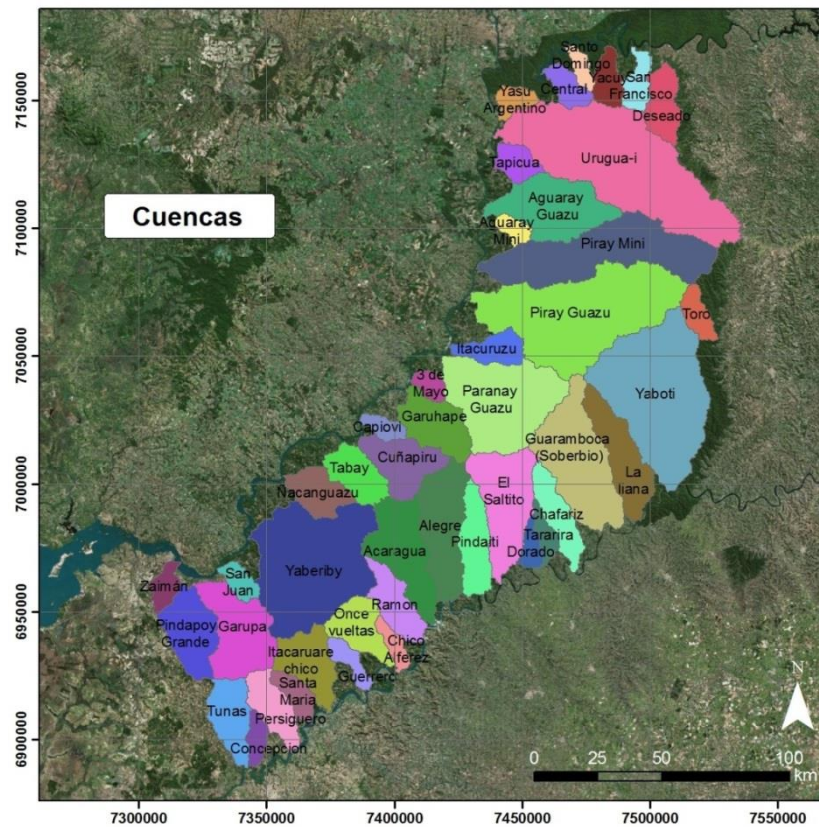


Figura 3.3.2. Curso más extenso y centroide de cuenca

Tabla 3.3.1. Características topográficas de las cuencas

#	Nombre	Area (km ²)	Long (km)	Pend (%)	Pend* (%)
1	Urugua-i	2528	203	0.36	0.16
2	Piray Guazu	2135	174	0.39	0.22
3	Yaboti	1997	144	0.42	0.23
4	Yabebiry	1869	109	0.35	0.16
5	Piray Mini	1459	174	0.40	0.24
6	Paranay Guazu	1311	94	0.55	0.31
7	Guaramboca (Soberbio)	1153	117	0.44	0.25
8	El Saltito	857	90	0.51	0.36
9	Aguaray Guazu	853	89	0.52	0.20
10	Acaragua	774	89	0.42	0.31
11	Garupa	764	64	0.37	0.15
12	Alegre	757	90	0.49	0.38
13	La liana	608	89	0.52	0.45
14	Pindapoy Grande	554	51	0.32	0.16
15	Garuhape	509	65	0.73	0.32
16	Cuñapiru	508	59	0.74	0.46
17	Itacaruare chico	477	54	0.51	0.16

#	Nombre	Area (km ²)	Long (km)	Pend (%)	Pend* (%)
18	Pindaiti	430	68	0.62	0.42
19	Tunas	424	50	0.39	0.16
20	Once vueltas	391	48	0.60	0.47
21	Ramon	374	53	0.55	0.56
22	Tabay	373	40	0.96	0.42
23	Chafariz	361	68	0.63	0.48
24	Persiguero	354	49	0.53	0.26
25	Đacanguazu	338	41	0.89	0.39
26	Deseado	325	50	0.66	0.41
27	Itacuruзу	258	44	1.12	0.53
28	Yacuy	205	35	0.74	0.29
29	Tapicua	195	26	0.90	0.43
30	San Francisco	195	41	0.73	0.31
31	Santa Maria	185	33	0.76	0.26
32	Central	185	35	0.61	0.29
33	Toro	179	34	1.19	0.81
34	Zaimβn	154	30	0.35	0.22
35	Guerrero	151	35	0.76	0.57
36	San Juan	143	30	0.84	0.42
37	Yasu Argentino	142	26	0.88	0.29
38	Concepcion	132	28	0.77	0.25
39	Tararira	130	40	1.00	0.90
40	Chico Alferez	128	30	0.94	0.69
41	Dorado	121	29	1.36	1.09
42	Capiovi	121	26	1.29	0.57
43	3 de Mayo	112	20	1.01	0.71
44	Aguaray Mini	108	22	1.14	0.65
45	Santo Domingo	104	27	0.63	0.35

3.3.2 Modelo de balance vertical

El balance vertical de agua se efectúa mediante el método SMA (*Soil Moisture Accounting*¹¹), que plantea una distinción entre 5 compartimientos, a saber (Figura 3.3.3):

- *Follaje*: Intercepta parte del agua de las precipitaciones, impidiendo su llegada a la superficie del terreno.
- *Superficie del terreno*: Almacena en sus depresiones parte del agua que cae sobre ella, impidiendo que escurra.

¹¹ Bennett, T.H. and Peters, J.C., 2000, "Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)", Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Water Resources 2000, Rollin H. Hotchkiss, Michael Glade - Editors, July 30 – August 2, Minneapolis, Minnesota, USA.

- *Capa superior de suelo:* Es la zona de raíces, donde puede haber extracción de agua por evapotranspiración. Consta, a su vez, de dos zonas; la denominada Zona Superior es la de agua libre, que también puede perderse por percolación, mientras que la Zona Capilar es la de agua capilar, que sólo puede extraerse por evapotranspiración. Hay infiltración de agua hacia esta capa desde la superficie del terreno, si es que esta capa no se encuentra saturada y si no se trata de una superficie impermeable.
- *Capas subterránea superior y subterránea inferior:* Se trata de las zonas de interflujo (ó flujo hipodérmico), el cual se desplaza relativamente rápido en relación al flujo de aguas subterráneas, y que produce un flujo de base a la salida de la subcuenca. Puede haber percolación desde la capa superior hacia la inferior.

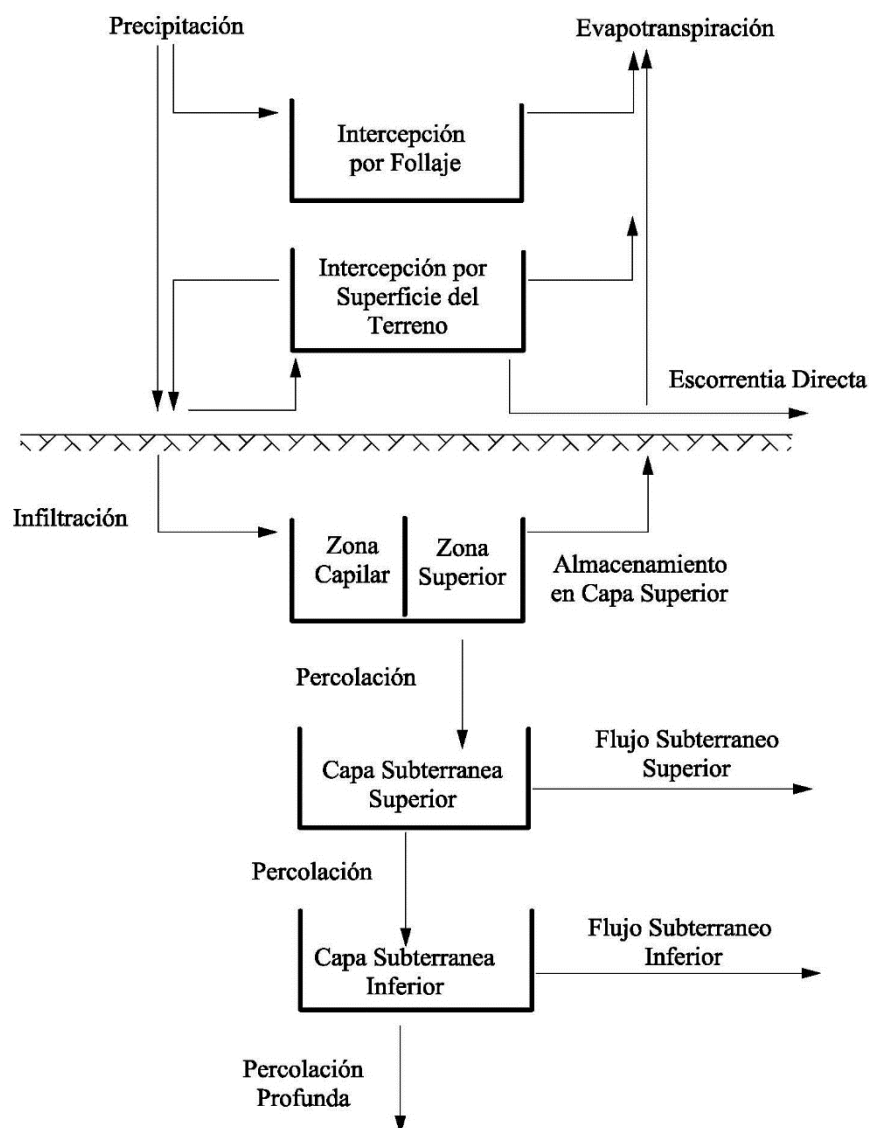


Figura 3.3.3. Esquema conceptual del SMA

Los siguientes son los datos necesarios para poder efectuar el balance vertical:

- *Almacenamientos iniciales*: Estos son los valores al principio del ciclo. En una simulación continua sólo influyen durante un transitorio, cuya duración es necesario estimar.
- *Almacenamientos máximos*: Son las capacidades máximas de cada compartimiento.
- *Infiltración/Percolaciones máximas*: Se trata de las máximas velocidades de flujo hacia cada uno de los tres compartimientos de suelo.
- *Tiempo de retardo subterráneo*: Representa la constante de tiempo con que se parametriza el interflujo, que constituye una medida del tiempo en el que el agua alcanza la salida de la subcuenca.
- *Impermeabilidad*: Indica la fracción de superficie en la que no se produce infiltración.

A continuación se presentan valores indicativos de estos parámetros.

3.4 Parámetros de la modelación hidrológica

3.4.1 Almacenamiento máximo

El almacenamiento máximo en follaje, h_f , depende del tipo de vegetación. En la Tabla 3.4.1 se presentan valores indicativos.

Tabla 3.4.1. Almacenamiento máximo en follaje por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Intercepción [mm]
Bosque	9
Matorral	4
Herbazal	3
Urbano y baldío	0
Desnudo	0
Plantación forestal	9
Parques urbanos	3
Cultivos agrícolas	1

El almacenamiento máximo en depresiones, h_d , depende del tipo de superficie del suelo (pavimentada o no), tal como se muestra en la Tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2. Almacenamiento máximo en depresiones por tipo y pendiente.

Descripción	Pendiente (%)	Almacenamiento (mm)
Zonas Pavimentadas		3,2 – 6,4
Pendientes fuertes	>30%	1,0
Pendientes suaves	10 - 30%	12,7 – 6,4
Zonas llanas	0 - 5%	50,8

El espesor de la Capa Superior de suelo es del orden de 0,50 m, valor típico del horizonte radicular. Ahora bien, el almacenamiento máximo en la Zona Superior de esa capa depende de la porosidad del medio. En la Tabla 3.4.3 se indican valores típicos por tipo de suelo.

Tabla 3.4.3. Porosidad para distintos tipos de suelos.

Clase de Suelo	Porosidad	Porosidad efectiva
Arena	0,437	0,417
Arena margosa	0,437	0,401
Marga arenosa	0,453	0,412
Marga	0,463	0,434
Marga limosa	0,501	0,486
Marga areno-arcillosa	0,398	0,330
Marga arcillosa	0,464	0,309
Marga limo-arcillosa	0,471	0,432
Arcilla arenosa	0,430	0,321
Arcilla limosa	0,479	0,423
Arcilla	0,475	0,388

Con respecto al almacenamiento máximo en la Zona Capilar de la Capa Superior de suelo, este puede estimarse a partir de la regla de reconocimiento mostrada en la Tabla 3.4.4, que indica el rango de valores esperado en función de la frecuencia de aparición de escorrentía.

Tabla 3.4.4. Almacenamiento máximo en la Zona Capilar, de acuerdo a la frecuencia observada de eventos de escorrentía.

Frecuencia de Escorrentía	Almacenamiento máximo en Zona Capilar (mm)
En todos los eventos	10,2 – 15,2
En eventos moderados	15,2 – 25,4
Solo en eventos largos	25,4 – 40,6
Nunca	> 40,6

3.4.2 Infiltración máxima y percolaciones

En la Tabla 3.4.5 se presentan valores representativo de infiltración por tipo de suelo.

Tabla 3.4.5 Infiltración máxima por tipo de suelo.

Grupo hidrológico de suelo	Infiltración Superficial (mm/hr)
A	> 7,6
B	3,8 – 7,6
C	1,3 – 3,8
D	0 – 1,27

La percolación máxima desde la Capa Superior de suelo a la Capa Subterránea puede considerarse del orden de la conductividad hidráulica. La Tabla 3.4.6 muestra rangos típicos de este último parámetro de acuerdo a las características de filtración observada.

Tabla 3.4.6. Conductividad hidráulica de acuerdo a las características de filtración.

Conductividad hidráulica [mm/h]	Características de filtración
< 0,8	Muy lenta
0,8 – 5	Lenta
5 – 20	Moderadamente lenta
20 – 60	Moderada
60 – 120	Moderadamente rápida
120 – 180	Rápida

3.4.3 Flujo de base

El transporte del flujo de base se efectúa mediante el método del reservorio lineal, que requiere la especificación del tiempo de retardo. Este tiempo surge de la observación.

3.4.4 Escorrentía superficial

Para el transporte de la escorrentía superficial se utiliza el método del hidrograma unitario del SCS¹². Este requiere especificar el tiempo de retardo, Tlag, sugiriendo su estimación como el 60% del tiempo de concentración, Tc, de la cuenca. Este se calculó utilizando la fórmula de Kirpich, de donde surgieron los valores por cuenca mostrados en la Tabla 3.4.7.4.7.

Tabla 3.4.7. Escalas de tiempo de las cuencas.

#	Nombre	Tc (min)	Tlag (min)
1	Urugua-i	2132	1279
2	Piray Guazu	1842	1105
3	Yaboti	1546	927
4	Yabebiry	1329	797
5	Piray Mini	1820	1092
6	Paranay Guazu	995	597
7	Guaramboca (Soberbio)	1295	777
8	El Saltito	1001	600
9	Aguaray Guazu	978	587
10	Acaragua	1069	641
11	Garupa	859	516
12	Alegre	1013	608
13	La liana	982	589
14	Pindapoy Grande	767	460
15	Garuhape	679	407
16	Cuíapiru	626	376
17	Itacaruare chico	670	402
18	Pindaiti	747	448
19	Tunas	701	421
20	Once vueltas	577	346
21	Ramon	649	389
22	Tabay	422	253

¹² Ven Te Chow, 1994, "Hidrología Aplicada", Maidment Mays

#	Nombre	Tc (min)	Tlag (min)
23	Chafariz	743	446
24	Persiguero	613	368
25	Nacanguazu	440	264
26	Deseado	575	345
27	Itacuruзу	424	254
28	Yacuy	417	250
29	Tapicua	311	187
30	San Francisco	473	284
31	Santa Maria	398	239
32	Central	447	268
33	Toro	340	204
34	Zaimán	497	298
35	Guerrero	410	246
36	San Juan	353	212
37	Yasu Argentino	311	186
38	Concepcion	343	206
39	Tararira	414	248
40	Chico Alferez	338	203
41	Dorado	283	170
42	Capiovi	268	161
43	3 de Mayo	245	147
44	Aguaray Mini	246	148
45	Santo Domingo	363	218

3.4.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial calculada con la fórmula de Penman-Monteith corresponde al valor de referencia, ETo. Para tener en cuenta la cobertura es necesario multiplicar ETo por el coeficiente de cultivo, Kc, que depende del uso del suelo¹³. Este coeficiente tiene un valor máximo, uno mínimo, y una variación temporal de tipo estacional, dependiendo del tipo de cultivo. En la Tabla 3.4.8 se presentan valores medios mensuales de Kc por cultivo típico de la Provincia. Se considera que 'forestación' también representa a los bosques naturales.

¹³ Allen, R.G., Smith, M., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., 1996. Modification of the FAO crop coefficient approach, In: Camp, C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.), Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the International Conference, November 3–6, San Antonio, TX, pp. 124–132. NRCS (Natural Resource Conservation Service), 1999, "Urban Hydrology for Small Watersheds", Engineering Division, Department of Agriculture, USA, Technical Release–55.

Se calculó la serie temporal de K_c efectivo por cuenca ponderando los valores de K_c por cultivo dominante con las series temporales de áreas implantadas de cada uno (de acuerdo a lo descrito en la sección 2.3.1), considerando que el remanente de área no implantada corresponde a bosque natural o forestación. A título ilustrativo, en la Figura 3.4.1 se muestra la serie resultante para la cuenca del Piray Guazú. Se observa que K_c oscila aproximadamente entre 0,795 y 0,810, es decir, muy cerca del valor asignado a forestación, lo cual se debe a que el área de cultivos sólo representa del orden del 5% del área de la cuenca. Siendo así, resulta posible tomar directamente un valor contante de K_c a lo largo del año.

Tabla 3.4.8. Coeficiente de cultivo por mes

Mes	Yerba/Te	Maíz	Forestación/tung	Soja
Julio	0.95	0.00	0.80	1.10
Agosto	0.95	0.00	0.80	1.10
Setiembre	0.98	1.05	0.80	0.30
Octubre	1.00	1.05	0.80	0.30
Noviembre	1.00	1.15	0.80	0.30
Diciembre	1.00	1.15	0.80	0.30
Enero	1.00	1.15	0.80	0.30
Febrero	1.00	1.15	0.80	0.30
Marzo	0.98	1.05	0.80	0.30
Abril	0.95	0.00	0.80	0.30
Mayo	0.95	0.00	0.80	0.30
Junio	0.95	0.00	0.80	1.10

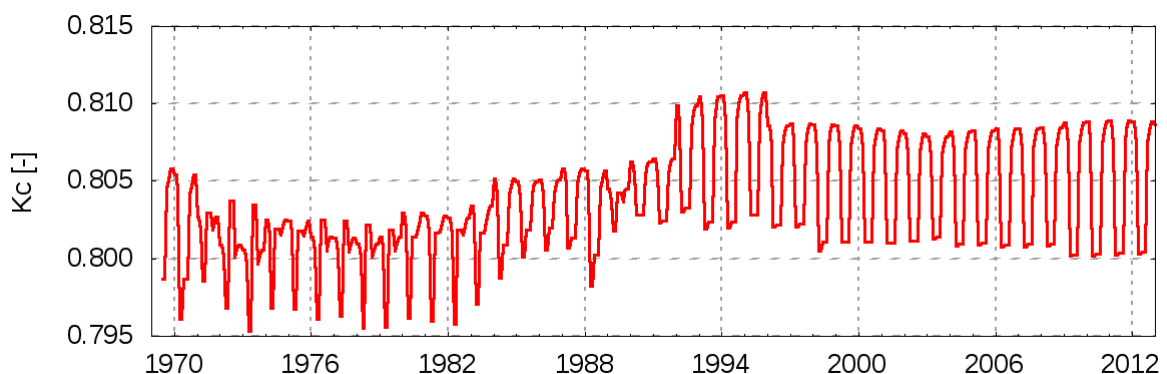


Figura 3.4.1. Serie histórica de K_c para la cuenca Piray Guazú.

3.5 Calibración

Se llevó adelante la calibración preliminar de una de las cuencas de la provincia. Específicamente, se tomó la cuenca Piray Guazú, que es una en la que existen aforos de caudal. La estación de aforos es Pinar Ciba, que se encuentra ubicada en el arroyo principal, antes del aporte del arroyo Las Antas (Figura 3.5.1). El área de aporte en la estación de medición es de 1400 km², que representa una parte significativa de la superficie de la cuenca, de 2135 km².

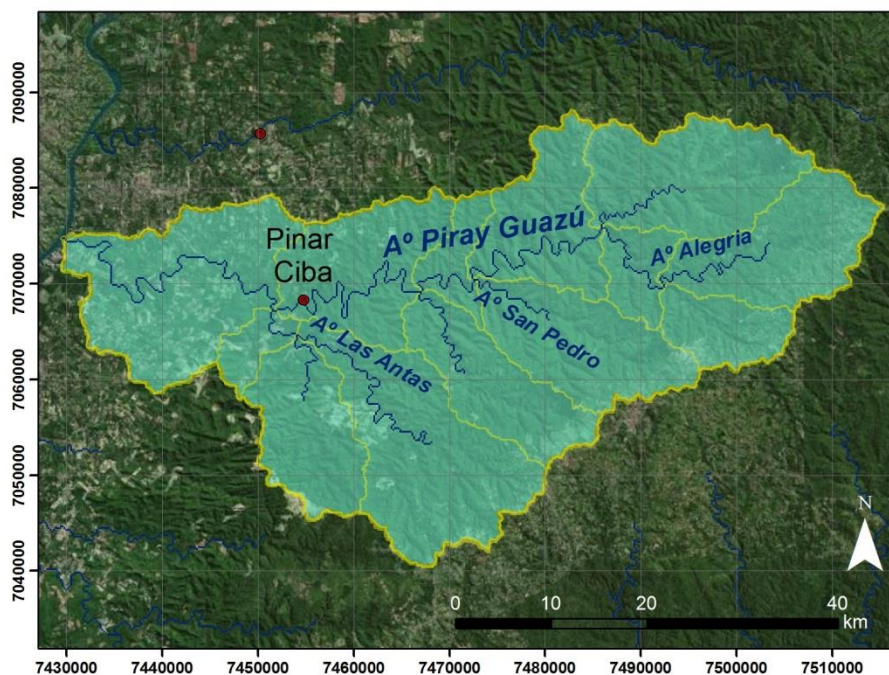


Figura 3.5.1. Cuenca Piray Guazú

Se cuenta con aproximadamente 50 años de mediciones de caudal, desde 1965 hasta 2013. Para la calibración se trabajó con los últimos 20 años (1993-2003), ya que es una ventana de tiempo relativamente extensa, actual y con datos completos tanto de precipitación como de caudal.

En esta etapa de calibración preliminar se ha simplificado el modelo de balance vertical, eliminando el almacenamiento de intercepción de superficie del terreno, y considerando que no hay percolación profunda, es decir que el único mecanismo para la pérdida de volumen de agua en el balance vertical es la evapotranspiración. Los valores de los parámetros obtenidos luego de la calibración se muestran en la Tabla 3.5.1.

Tabla 3.5.1. Valores de los parámetros de calibración de la cuenca Piray Guazú

Parámetro	Valor
Almacenamiento en follaje (mm)	20
Almacenamiento en Zona Superior (mm)	500
Almacenamiento en Zona Capilar (mm)	10
Almacenamiento Subterráneo Superior (mm)	5
Almacenamiento Subterráneo Inferior (mm)	1
Máxima infiltración (mm/h)	0.4
Percolación suelo (mm/h)	0.2
Percolación subterránea (mm/h)	0.1
Percolación subterránea profunda (mm/h)	1
Tiempo de retardo del reservorio subterráneo superior (hr)	12
Tiempo de retardo del reservorio subterráneo inferior (hr)	36
Tiempo de retardo de la subcuenca (min)	3000

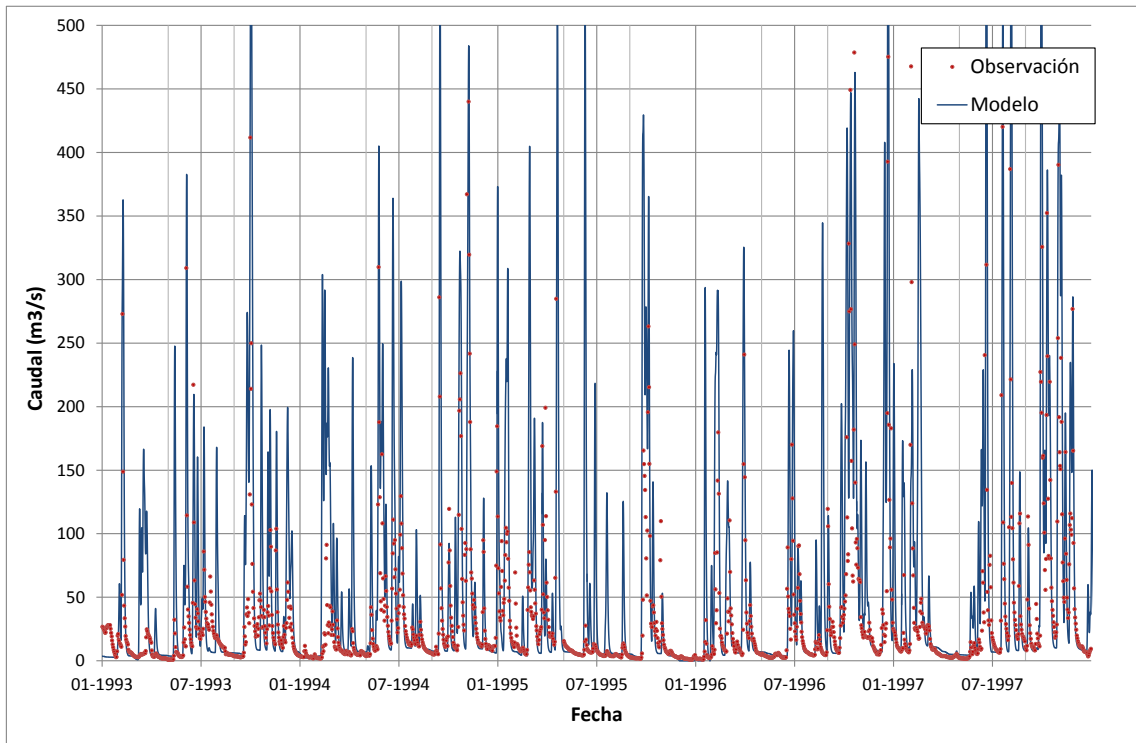
La comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo se muestran en la Figura 3.5.2. Se observa un acuerdo general satisfactorio.

El modelo representa más picos de caudal que los registrados. Si bien esto podría constituir una sobrestimación, debe tenerse en cuenta que la duración de los picos es relativamente pequeña, por lo cual varios podrían perderse en función del paso de muestreo.

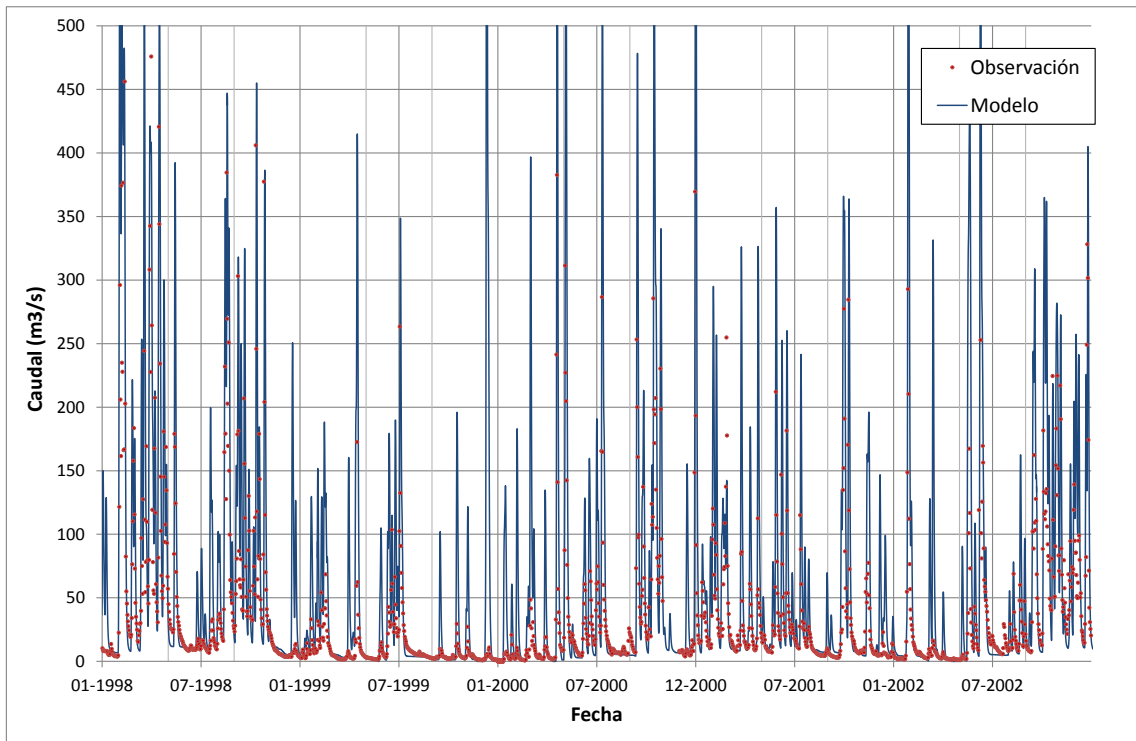
Por otro lado, la modulación del caudal base está bien representada. Esto queda evidenciado en la Tabla 3.5.2, donde se comparan los caudales correspondientes a distintos porcentajes de permanencia de acuerdo a observaciones y modelo. Téngase en cuenta que estos son, precisamente, los indicadores de utilidad para determinar el potencial hidroeléctrico.

Tabla 3.5.2. Permanencia de caudales

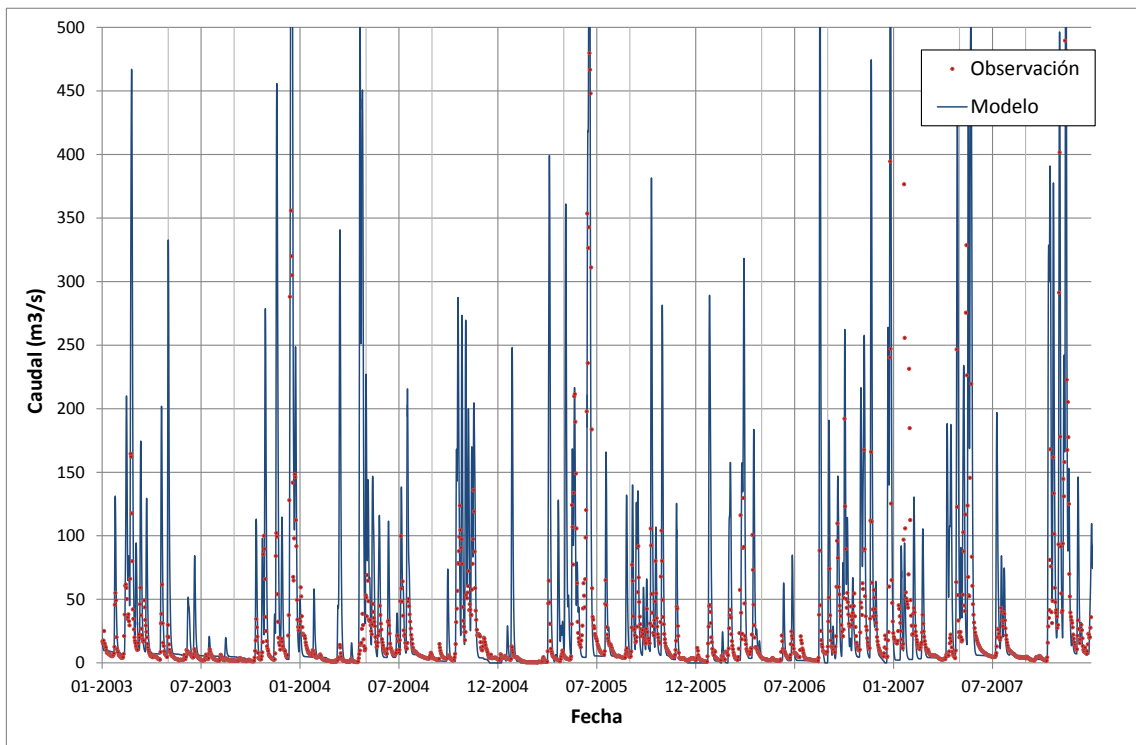
Permanencia	Caudal Modelado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
50%	10.40	10.62
60%	7.50	7.49
70%	5.70	5.20
80%	4.10	3.63
90%	1.80	2.25



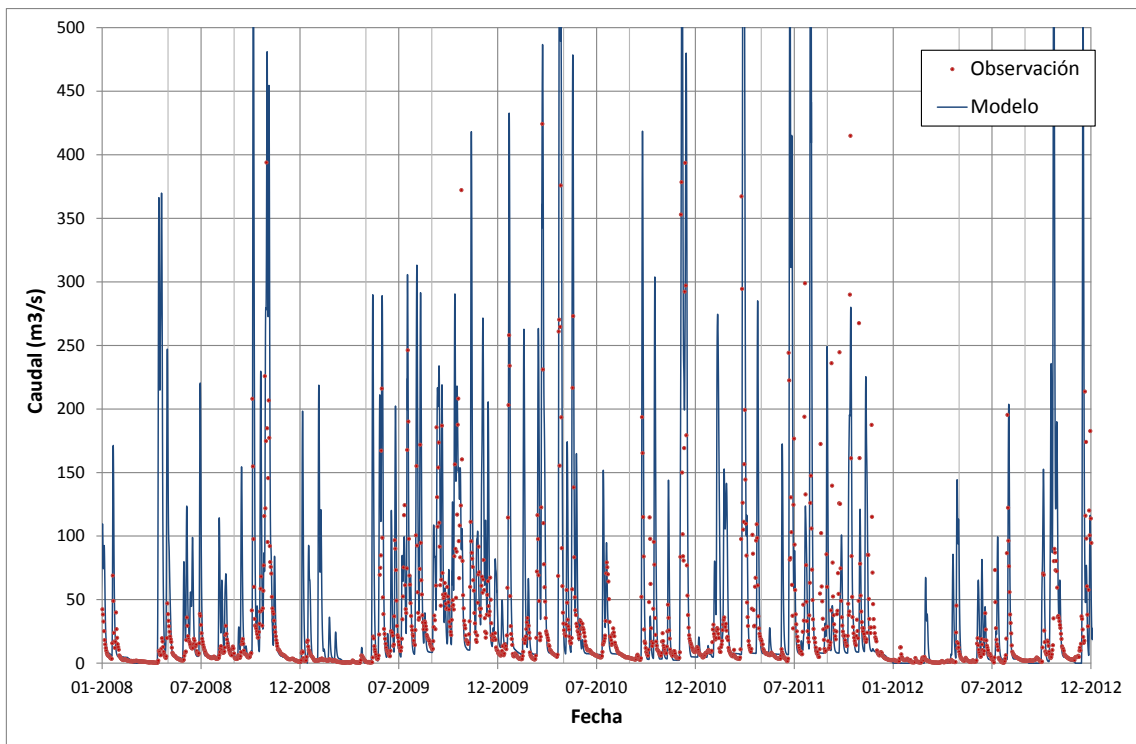
a) 1993 - 1998



b) 1998 - 2003



c) 2003 - 2008



d) 2008 - 2013

Figura 3.5.2. Calibración Piray – Guazú

4 CÁLCULO DE POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO

4.1 Metodología

El Potencial Hidroeléctrico Teórico (PHT) es una medida de la energía potencial disponible en un curso de agua para producir energía hidroeléctrica. Considera que la totalidad de esa energía potencial se transforma en energía eléctrica, es decir, que la eficiencia es del 100%.

Dada una ubicación sobre un curso de agua, el PHT de un aprovechamiento allí situado se calcula como (Figura 4.1.1)

$$PHT = 9,81 Q_{50\%} H$$

donde

PHT : Potencial Hidroeléctrico Teórico en kW

$Q_{50\%}$: caudal en ese punto correspondiente a una excedencia del 50%, en m³/s

H : altura proyectada del aprovechamiento, en m

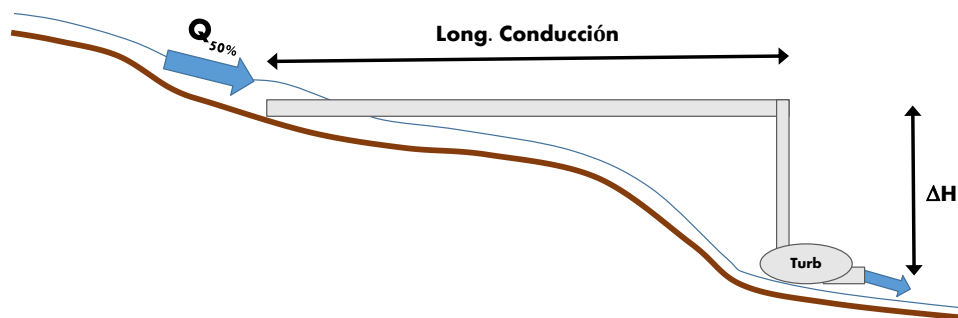


Figura 4.1.1. Esquema de aprovechamiento tipo adoptado en el análisis

Como metodología de evaluación del PHT de un curso de agua se ha establecido un cálculo de aprovechamientos de pasada en cascada, separados por una distancia fija. Para cada punto i de ubicación de un aprovechamiento (contado desde aguas arriba hacia aguas abajo), el PHT asociado se calcula como

$$PHT_i = 9,81 A q_{50\%} \Delta H_i$$

donde

PHT_i : Potencial Hidroeléctrico Teórico en el punto i , en kW

A : área de aporte al punto i , en km^2

$q_{50\%}$: caudal específico areal de la cuenca correspondiente a una excedencia del 50%, en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

ΔH_i : diferencia de nivel topográfico entre el punto i y el $i-1$, en m

Esta metodología se implementó en una rutina programada en *python* bajo el entorno *QGIS* (en adelante *HydroQGIS*), la cual genera un *shape* de puntos equiespaciados sobre los cauces principales, cuya separación (que representa la longitud del reservorio del aprovechamiento) se especifica como dato.

4.2 Aplicación

Como primera aplicación de *HydroQGIS*, se utilizaron los resultados del modelo hidrológico de la cuenca del Piray Guazú obtenidos en el capítulo anterior, estableciendo una longitud de reservorio de 1 km. En la Figura 4.2.1 se representan los valores locales de PHT calculados. El valor pico es de 2,2 MW.

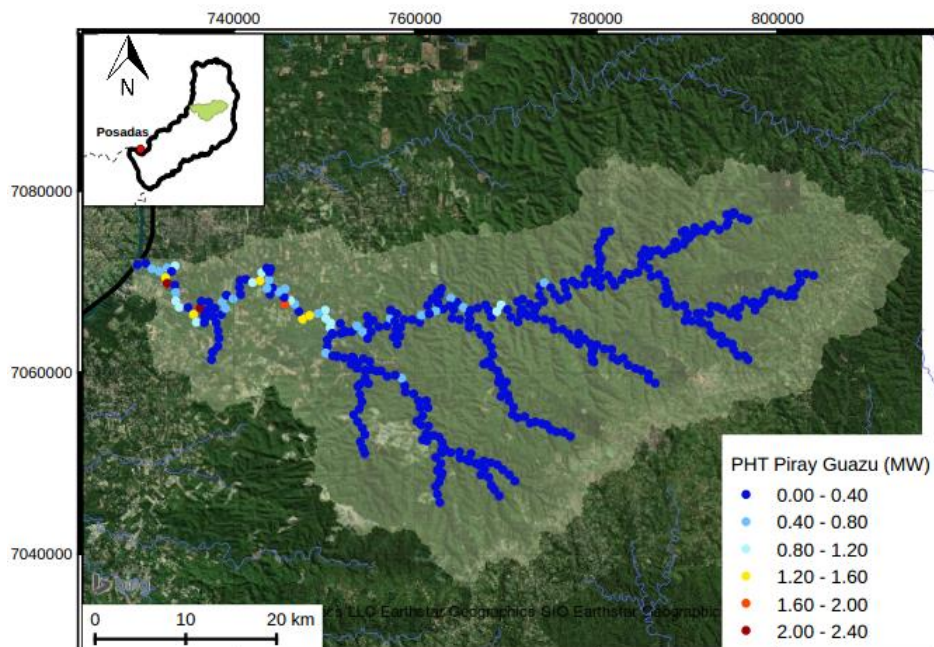


Figura 4.2.1. PHT locales para la cuenca del Piray Guazú

A modo de verificación de la metodología, en la Figura 4.2.2 se muestra el detalle de la imagen satelital en torno a uno de los puntos de mayor PHT. Se observa sobre el curso de agua una coloración blanca, seguramente asociada a la presencia de espuma/aireación generada por un salto topográfico relativamente significativo. Aunque también hay que tener en cuenta que se trata de un punto ubicado en la cuenca baja, por lo que el área de aporte es relativamente alta.

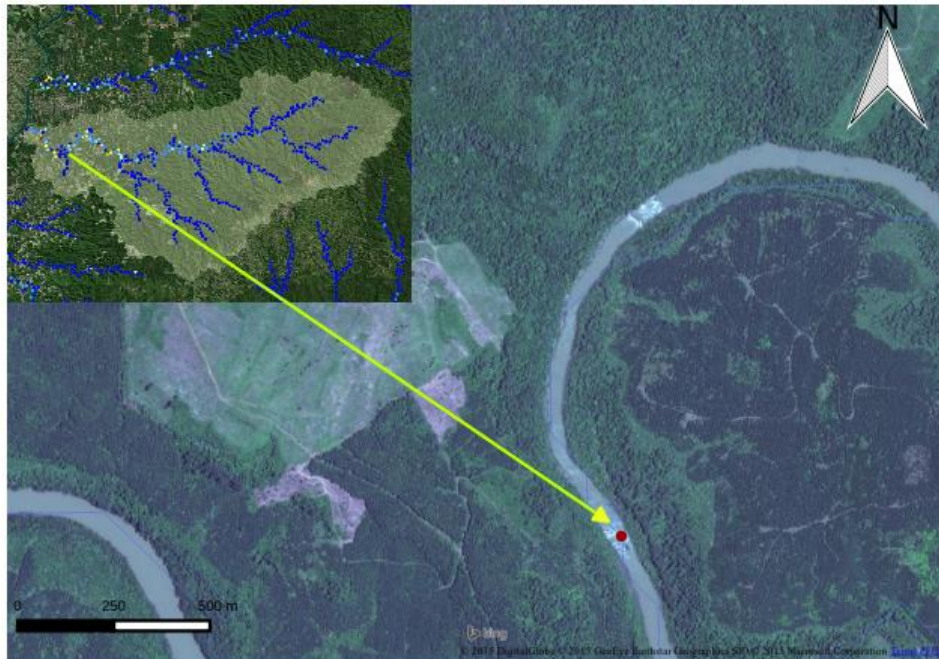


Figura 4.3 Detalle de sitio con alto PHT

En la Tabla 4.3.1 se presentan los puntos que tienen un PHT mayor a 0,4 MW, que son 44 en total. El PHT acumulado del Piray Guazú, para aprovechamientos con PHT mayor a 0,4 MW y 1 km de extensión de reservorio, sería de 36,1 MW.

Tabla 4.2.1. Puntos con PHT > 0,4MW

#	Area de aporte (km ²)	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	PHT (MW)
1	496	3.7	16	0.6
2	713	5.3	8	0.4
3	938	7	13	0.9
4	937	7	12	0.8
5	979	7.3	9	0.6
6	1148	8.5	7	0.6
7	1140	8.5	7	0.6
8	1151	8.6	6	0.5
9	1225	9.1	5	0.4
10	1267	9.4	6	0.6
11	1281	9.5	7	0.7
12	1837	13.6	6	0.8
13	1837	13.6	6	0.8
14	1835	13.6	5	0.7
15	1847	13.7	9	1.2
16	1843	13.7	8	1.1
17	1839	13.7	7	0.9
18	1844	13.7	3	0.4
19	1851	13.8	10	1.3
20	1854	13.8	3	0.4
21	1885	14	11	1.5
22	1885	14	6	0.8
23	1888	14	4	0.6
24	1896	14.1	4	0.6
25	1891	14.1	4	0.6
26	1897	14.1	3	0.4
27	1947	14.5	8	1.1
28	1946	14.5	6	0.9
29	1962	14.6	6	0.9
30	1979	14.7	5	0.7
31	1990	14.8	5	0.7
32	1989	14.8	5	0.7
33	2007	14.9	15	2.2
34	2071	15.4	8	1.2
35	2069	15.4	7	1.1
36	2073	15.4	5	0.8
37	2106	15.6	7	1.1
38	2114	15.7	12	1.8
39	2116	15.7	8	1.2
40	2109	15.7	4	0.6
41	2127	15.8	5	0.8
42	2129	15.8	4	0.6
43	2131	15.8	3	0.5
44	2130	15.8	3	0.5

5 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta fase de los estudios:

- En base a la información disponible, se ha implementado la modelación hidrológica de toda la Provincia de Misiones.
- Se determinaron cuencas con áreas no menores a 100 km², resultando un total de 45 cuencas.
- Se llevó adelante la calibración preliminar de la cuenca Piray Guazú, que es una en la que existen aforos de caudal. La comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo resultó satisfactoria en términos generales.
- Como metodología de evaluación del PHT de un curso de agua se ha establecido un cálculo de aprovechamientos de pasada en cascada, separados por una distancia fija.
- Se aplicó esa metodología a la cuenca del Piray Guazú, con los resultados de la calibración preliminar, estableciendo una longitud de reservorio de 1 km. Se contabilizaron 44 aprovechamientos con un PHT mayor a 0,4 MW, con un valor pico de 2,2 MW. El PHT acumulado de estos emprendimientos sería de 36,1 MW.

En la siguiente fase del estudio se procederá a la calibración definitiva de las cuencas aforadas, la explotación del modelo para las cuencas no aforadas, y la determinación del PHT para todas ellas.

