

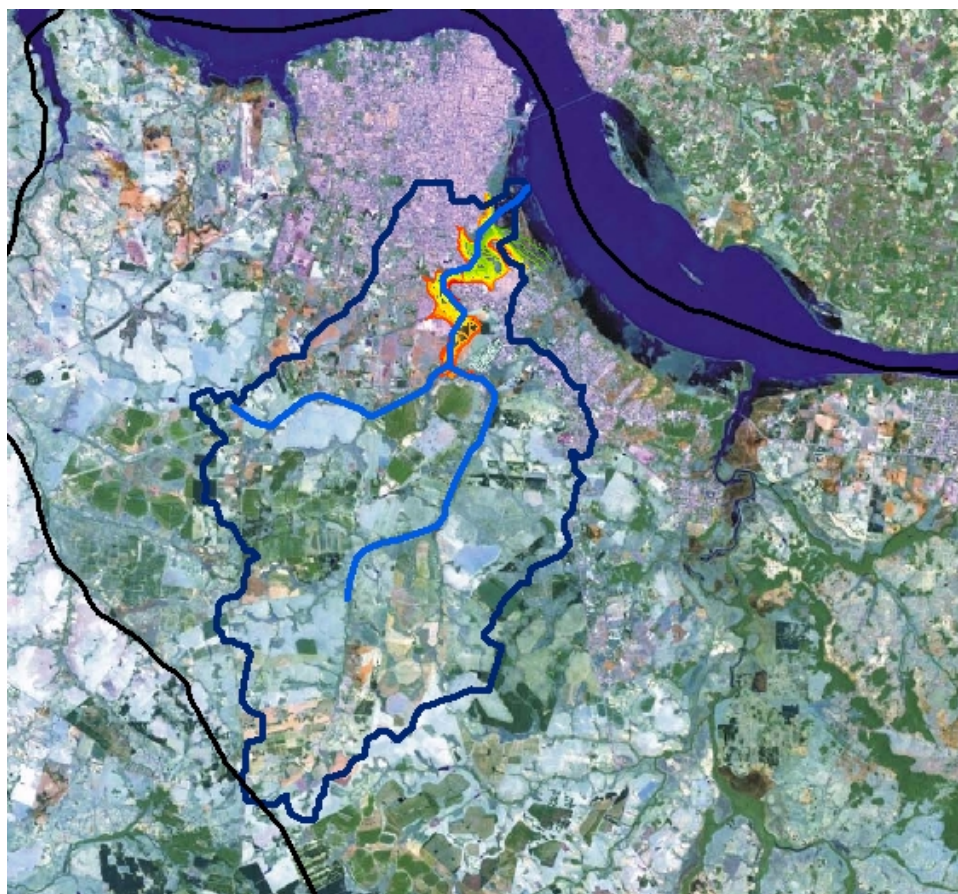


INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
REPÚBLICA ARGENTINA



ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO DE LOS
SUBEMBALSES DE YACYRETÁ

MODELACIÓN DEL ARROYO ZAIMÁN



Proyecto LHA 287
Informe LHA 02-287-08
Ezeiza, Enero de 2008

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. Alejo SARUBBI

Ing. Mag. Mariano RE

Sr. Emilio A. LECERTÚA

Sr. Martín SABAROTS GERBEC

INFORME PRODUCIDO POR

Ángel N. MENÉNDEZ, Emilio LECERTÚA, Martín SABAROTS GERBEC, Alejo SARUBBI

Colaboración de

Ing. Marcelo CARDINALI, Ing. Mauricio PERAYRE (EBY)

MODELACIÓN DEL ARROYO ZAIMÁN

RESUMEN

Se describe la implementación del modelo matemático hidrológico-hidráulico del A° Zaimán, en base al paradigma de la simulación continua en el tiempo. Se explican los criterios de selección de los submodelos y de los valores de los parámetros asociados, partiendo de la base de datos recopilada y presentada en el Primer Informe (LHA 02-287-08). Se analiza la respuesta del modelo mediante ensayos para un escenario de prueba. Se analiza la influencia del efecto de remanso por la elevación de la cota del embalse de Yacyretá desde 78 a 83 m, comparando corridas a ambas cotas. Se calibra el modelo en base a series de niveles registrados, y se lo verifica utilizando estimaciones de niveles pico en base a fotografías.

DESCRIPTORES TEMÁTICOS: modelo matemático hidrológico, modelación hidrológica continua, modelo matemático hidráulico, riesgo de inundación.

DESCRIPTORES GEOGRÁFICOS E INSTITUCIONALES: Arroyo Zaimán, embalse de Yacyretá, Entidad Binacional Yacyretá.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN

2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

2.2 PRECIPITACIONES

2.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

2.3.1 Coeficiente de cultivo

2.3.2 Coeficiente de sequedad

2.3.3 Radiación neta

2.3.4 Comparación

2.4 BALANCE VERTICAL

2.4.1 Almacenamientos máximos

2.4.2 Infiltración/percolaciones máximas

2.4.3 Tiempo de retardo

2.4.4 Impermeabilidad

2.5 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

2.6 FLUJO DE BASE

2.7 FLUJO CONCENTRADO

2.7.1 Geometría

2.7.2 Forzantes

2.7.3 Condicionantes

2.7.4 Pasos de discretización

3 RESULTADOS

3.1 PRODUCCIÓN DE SUBCUENCAS

3.1.1 Implementación básica

3.1.2 Análisis de sensibilidad

3.2 RESPUESTA DEL ARROYO

3.2.1 Caudales

3.2.2 Niveles

3.3 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

4 CONCLUSIONES

1 INTRODUCCIÓN

La Entidad Binacional Yacyretá (EBY) ha encomendado al INA la ejecución de estudios para desarrollar una metodología que permita determinar el comportamiento hidrológico-hidráulico de dos de los principales arroyos asociados a subembalses urbanos del embalse de Yacyretá, a saber, el Zaimán (margen argentina) y el Mboi Caé (margen paraguaya) bajo distintos escenarios hidrometeorológicos. La metodología consiste en la implementación de sendos modelos matemáticos hidrológico-hidráulicos, bajo el paradigma de la simulación continua en el tiempo.

En el Primer Informe¹ se describió la base de datos construida para el A° Zaimán, que sirve de soporte para la modelación. En el presente Informe se describe la implementación y calibración del modelo hidrológico-hidráulico de este arroyo. En un próximo Informe se presentarán resultados de su explotación.

¹ “Base de Datos del Arroyo Zaimán”, Informe LHA-INA 01-287-07, setiembre de 2007.

2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El modelo matemático hidrológico-hidráulico transforma los datos de precipitaciones en hidrogramas (modelo hidrológico) y transporta estos caudales a lo largo del curso de agua representado (modelo hidráulico). En el presente caso, se representa el A° Zaimán.

La cuenca del Zaimán se subdivide en subcuencas de aporte a este arroyo. Como forzante del sistema, además de las precipitaciones actúa la evapotranspiración potencial. El modelo efectúa el balance vertical de agua en forma dinámica y continua en el tiempo (en lugar de concentrarse en eventos específicos); el excedente de este balance es el que se transporta cuenca abajo, ya sea como escorrentía superficial ó como interflujo. Los hidrogramas resultantes al pie de cada subcuenca alimentan el flujo a lo largo del A° Zaimán.

Se utiliza los software de dominio público HEC-HMS² para la modelación hidrológica y HEC-RAS³ para la modelación hidráulica. Los resultados del primero alimentan directamente al segundo.

En primer lugar se trabaja con un escenario de prueba, motorizado por los forzantes (precipitaciones y evapotranspiración potencial) del año 2004, aunque el embalse se mantiene a cota 78 m y el almacenamiento subterráneo inicial se considera nulo. Este escenario se utiliza para la etapa de implementación y análisis de sensibilidad. Durante la etapa de calibración se simulan los escenarios específicos de los eventos de calibración disponibles.

2.2 PRECIPITACIONES

Las precipitaciones constituyen el forzante principal del sistema. Se utiliza la serie de precipitaciones diarias del INTA Zaimán. En la Figura 2.2.1 se muestra esa serie para la ventana de tiempo del escenario de prueba.

En el Primer Informe se había detectado una incompatibilidad en los datos de precipitación de esa estación correspondientes al período 1996-1998. Esta fue explicada como una infiltración de datos erróneos, ya que se consiguieron los registros originales, con lo que la serie temporal resultó totalmente compatible con la de Encarnación.

² www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms

³ www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras

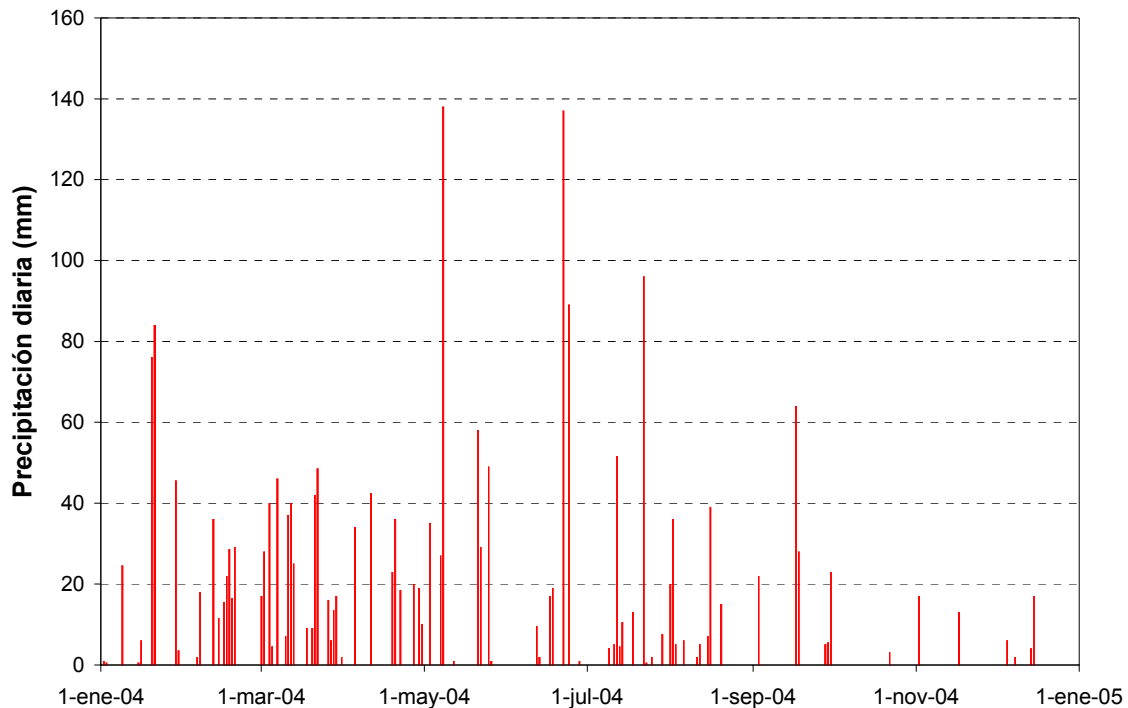


Figura 2.2.1: Precipitaciones diarias en INTA-Zaimán para el año 2004

2.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La evapotranspiración potencial es el segundo forzante del sistema. Para su determinación se utiliza la ecuación de Priestley-Taylor⁴. Esta requiere la especificación de los siguientes parámetros:

- Coeficiente de cultivo (K_c)
- Coeficiente de sequedad (K_s)
- Radiación neta (R_n)
- Temperatura

A continuación, se describe la generación de esta información.

2.3.1 Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo representa la capacidad de la vegetación de intervenir como intermediario efectivo para la evapotranspiración. Presenta una tendencia estacional, ya que se suceden etapas de desarrollo, de plenitud y de decadencia. Esto se esquematiza en la Figura 2.3.1, donde se indican los valores base con los cuales es posible construir el esquema.

⁴ http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/manual/simulation/et/priestly_taylor.htm

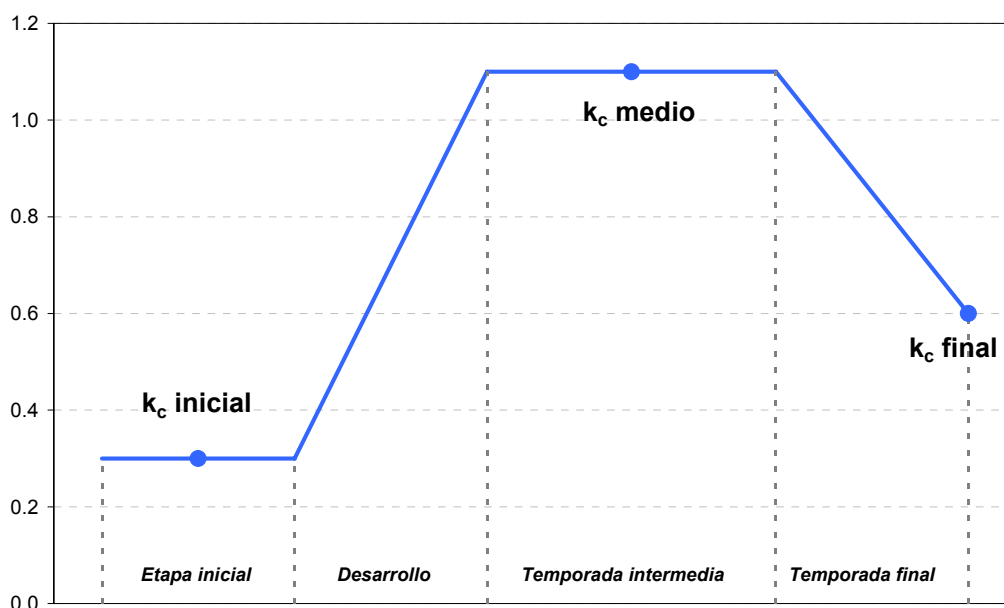


Figura 2.3.1: Ciclo del coeficiente de cultivo

En la cuenca del Zaimán se han distinguido tres tipos de vegetación dominantes: cultivos de yerba mate (*Ilex paraguariensis*), plantaciones forestales y pastizales. En la Tabla 2.3.1 se indican los valores base del coeficiente de cultivo para los tres tipos.

Tabla 2.3.1: Valores base del coeficiente de cultivo⁵

Vegetación	K_{c-ini}	K_{c-med}	K_{c-fin}
Yerba mate*	0,95	1	1
Forestación	0,8	0,8	0,8
Pastizal	0,3	0,75	0,75

*Estos valores corresponden al té, considerado un cultivo con características de cobertura similares a la de la yerba mate.

⁵ <http://texaset.tamu.edu/cropcoe.php>

En el caso de la yerba mate, el ciclo del cultivo es el siguiente⁶ (Figura 2.3.2a):

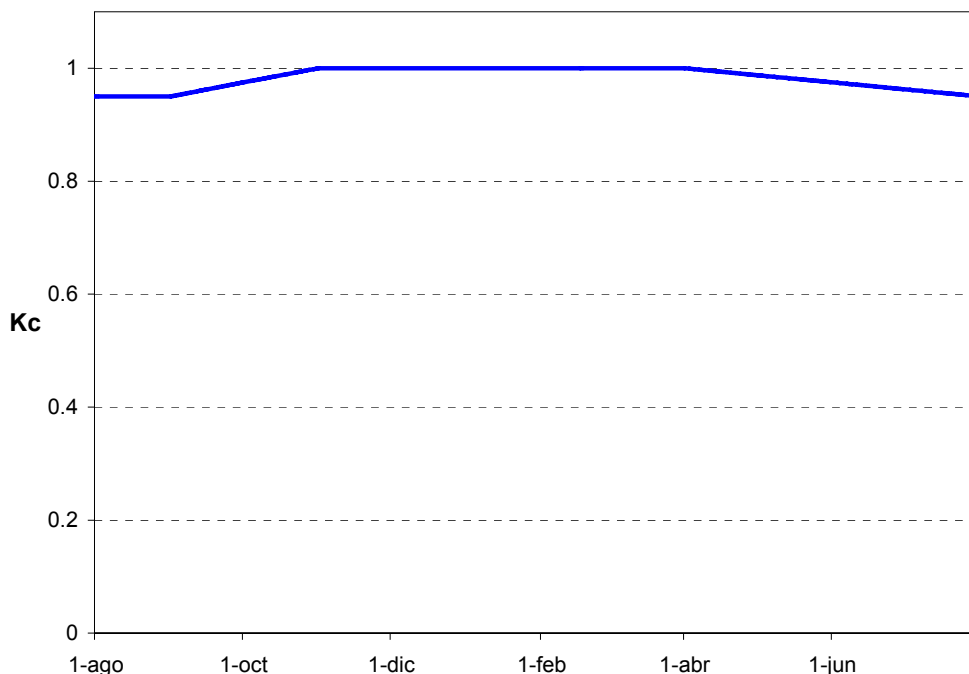
- *Agosto-Setiembre*: etapa inicial
- *Setiembre-Noviembre*: desarrollo
- *Noviembre-Marzo*: temporada media
- *Abril-Agosto*: temporada final

Para los pastizales se supuso el siguiente ciclo (Figura 2.3.2b):

- *Julio-Setiembre*: etapa inicial
- *Setiembre-Noviembre*: desarrollo
- *Noviembre-Marzo*: temporada media
- *Abril-Julio*: temporada final

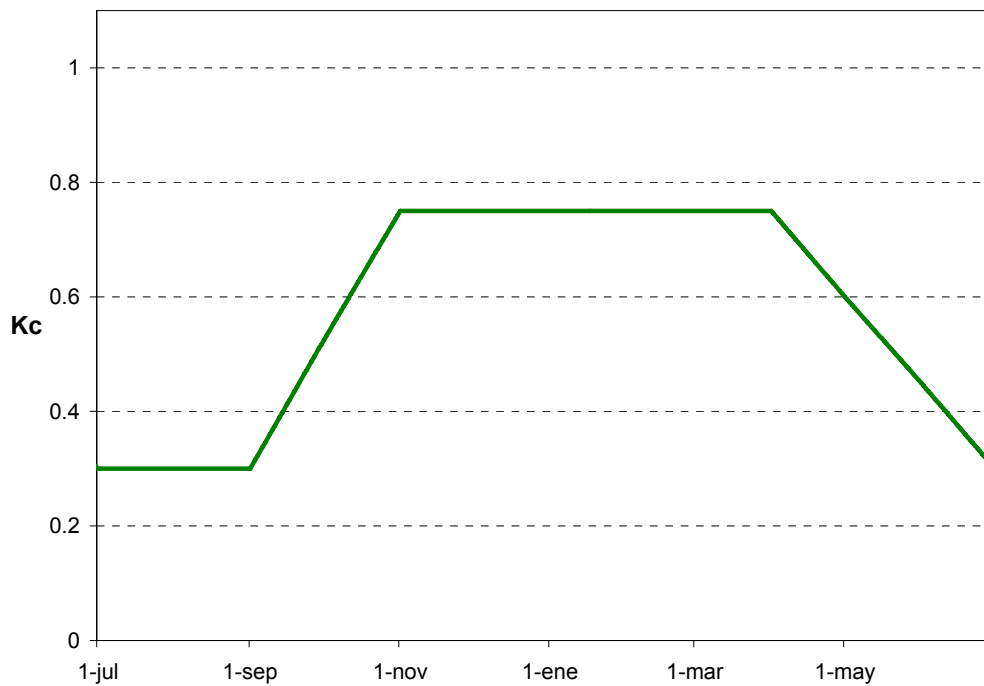
En cuanto a la forestación, nótese que de la Tabla 2.3.1 surge que no existe una modulación estacional significativa, ya que se trata de vegetación perenne.

El esquema del K_c efectivo para una zona surge como el promedio de estos esquemas básicos, pesando con las respectivas áreas de ocupación. A título meramente ilustrativo, en la Figura 2.3.3 se muestra el K_c efectivo para una zona hipotética donde existen sólo yerba mate y pastizales en forma equi-repartida.



a) Yerba mate

⁶ www.agro.misiones.gov.ar/biblioteca/Yerbaotro.htm



b) Pastizales

Figura 2.3.2: Ciclo del coeficiente de cultivo

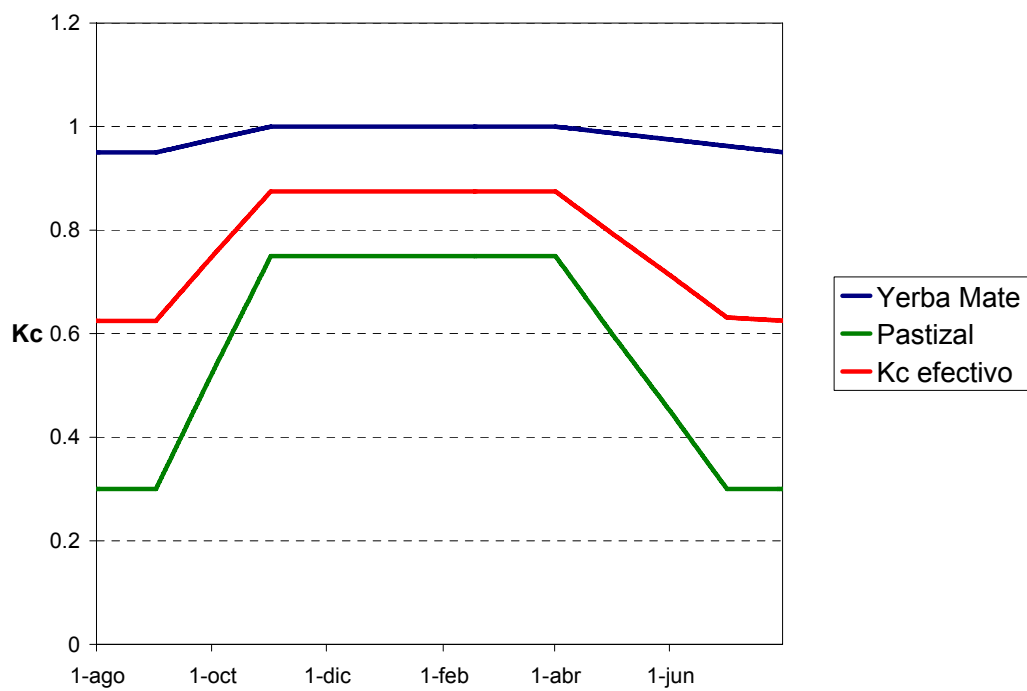


Figura 2.3.3: Ciclo del coeficiente de cultivo efectivo para una zona con equi-repartición de yerba mate y pastizal.

En la Figura 2.3.4 se muestra la zonificación de la cuenca en zonas de uso llevada a cabo en base al análisis de imágenes satelitales e información aportada por la estación Cerro Azul del INTA. En la Zona Urbana se considera que un 30% es impermeable, y que resto está cubierta con pastizales. De esta manera, la zona con cobertura efectiva de pastizales resulta fuertemente dominante, con el 78% de la superficie; le sigue en orden de importancia la zona cultivada con yerba mate, que representa el 15%; la forestación alcanza al 5% del área; sólo el 3% de la cuenca es considerado como impermeable.

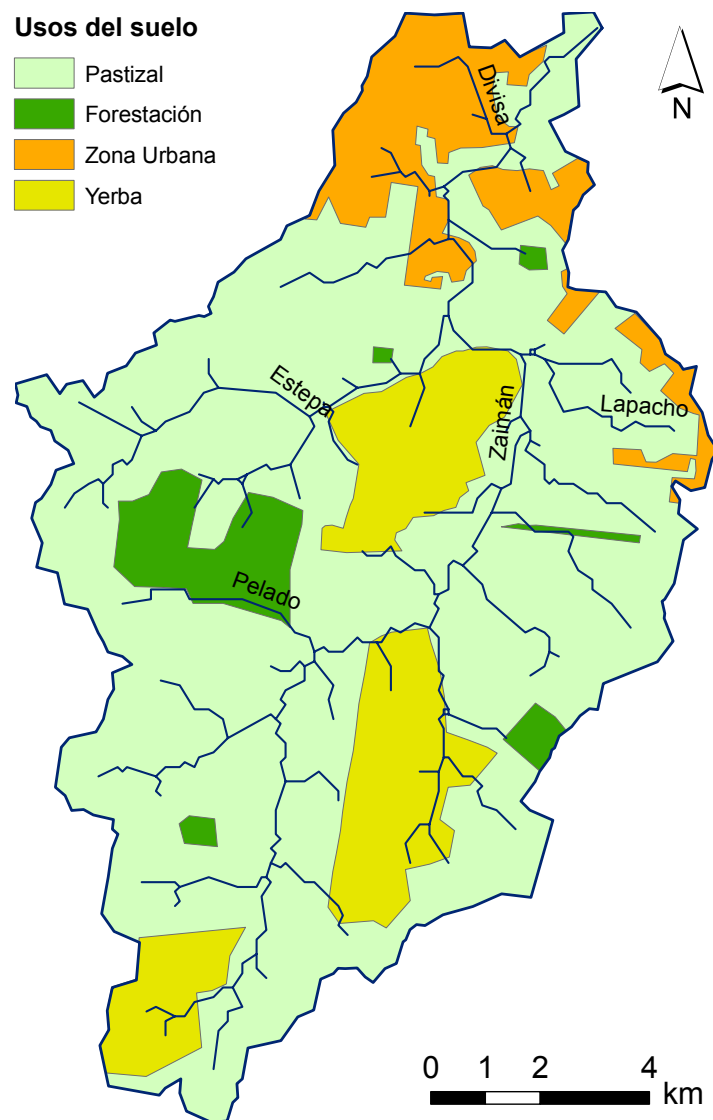


Figura 2.3.4: Zonificación del uso del suelo.

La asignación de esquemas de K_c efectivo se efectuó por subcuenca. Previamente se llevó a cabo una redefinición de la cantidad de subcuencas originalmente identificadas (ver Primer Informe), agregando las subcuencas muy pequeñas a las de mayor tamaño, de modo de tener

contribuciones hídricas comparables. De esta manera se llegó a una cantidad de 13 subcuencas, las cuales se muestran en la Figura 2.3.5 (en la Tabla 2.3.2 se indican los nombres asignados a cada una de ellas).

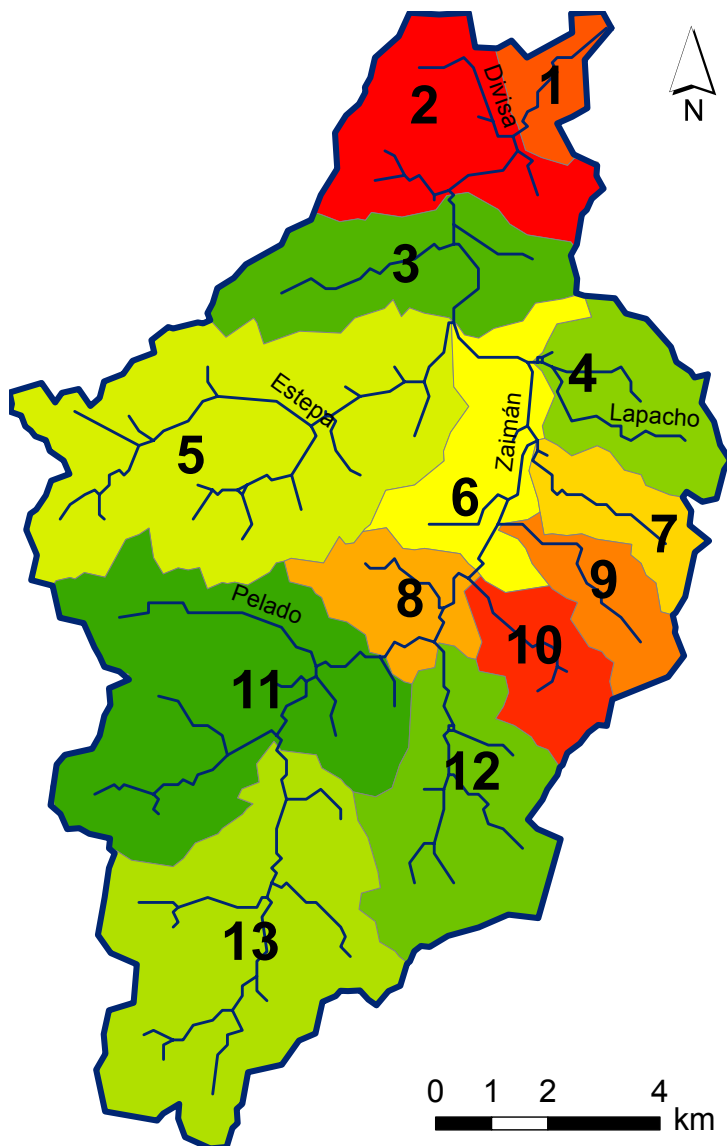


Figura 2.3.5: Subcuencas modeladas

Cruzando este mapa de uso de suelo con el de las subcuencas surgen las áreas de uso por subcuenca (Tabla 2.3.2), que se utilizan para determinar el correspondiente K_c efectivo.

Tabla 2.3.2: Uso del suelo de las subcuencas

ID	Nombre	Area	Urbano	Pastura	Yerba Mate	Forestación	Impermeable
----	--------	------	--------	---------	------------	-------------	-------------

		(km ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	Desembocadura	2.83	17	95	0	0	5
2	Divisa	11.25	83	75	0	0	25
3	Villa Dolores	10.90	15	94	0	2	4
4	Lapacho	7.63	23	93	0	0	7
5	Estepa	27.68	0	75	13	12	0
6	Intermedia	8.75	2	58	42	0	1
7	San Antonio	4.60	1	99	0	1	0
8	Santa Carla	5.38	0	79	20	1	0
9	San Ignacio	4.58	0	95	0	5	0
10	San José	5.25	0	94	0	6	0
11	Pelado	22.84	0	80	8	12	0
12	Santa Inés	12.90	0	54	43	3	0
13	Superior	22.81	0	75	25	1	0

2.3.2 Coeficiente de sequedad

El coeficiente de sequedad se utiliza para efectuar una pequeña corrección en base al estado de humedad del suelo. Para condiciones húmedas se utiliza el valor 1,2, mientras que para ambientes áridos se usa 1,3⁷. Para el presente problema se tomó $K_s = 1,2$.

2.3.3 Radiación neta

La Radiación Extraterrestre (R_a) depende, esencialmente, de la latitud. Para la presente situación se utiliza la latitud media, de 27° 30' S.

La fracción de R_a que alcanza la superficie terrestre (Figura 2.3.6), denominada Radiación Solar, Radiación Global ó Radiación de Onda Corta (R_s), depende, esencialmente, de la heliofanía efectiva. Se dispuso de series de valores medios mensuales de heliofanía efectiva tomados en la estación Cerro Azul del INTA sobre el período 1967-2006.

La Radiación Solar Neta o Radiación de Onda Corta Neta (R_{ns}), es decir, luego de la reflexión de la Radiación Solar sobre la superficie, se calcula a partir del albedo. Para este coeficiente se tomó el valor 0,23, representativo de zona de cultivos.

La Radiación de Onda Larga Neta (R_{nl}), resultante de la radiación de onda larga generada en la superficie y la fracción reflejada en las nubes, depende primariamente de la temperatura y la humedad relativa (que determina la presión). Se dispuso de la serie diaria de temperaturas en Encarnación, la cual fue filtrada a paso mensual para resultar compatible con los otros datos; a título ilustrativo, la Figura 2.3.7 muestra estos datos para el período 2004-2006. También se contó con la serie de valores medios mensuales de humedad relativa de la estación Cerro Azul del INTA; éstos se ilustran en la Figura 2.3.8 para el período 2004-2006.

⁷ “Hydrologic Modelling System HEC-HMS User’s Manual. Version 3.1.0”, November 2006.

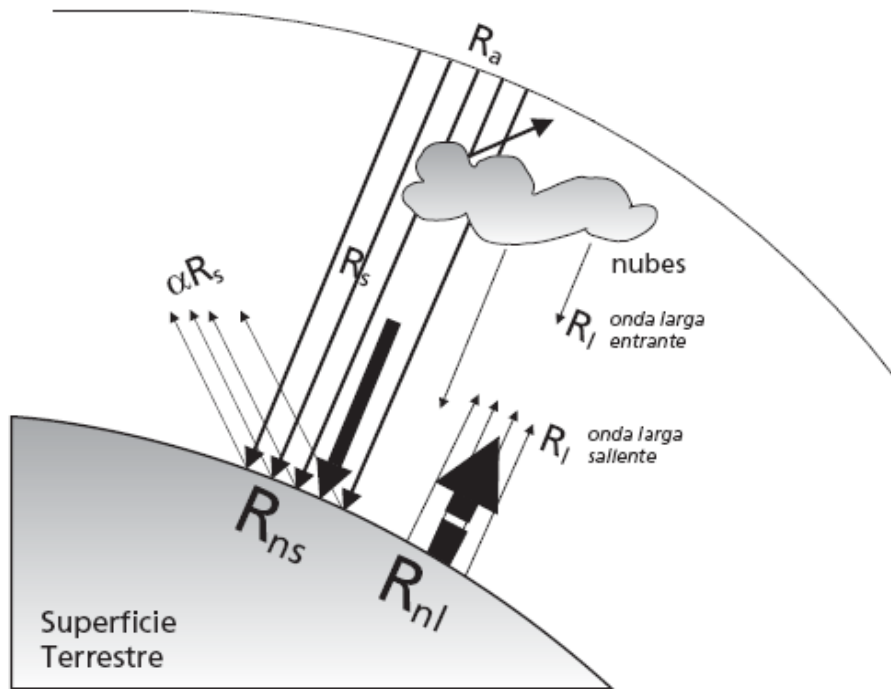


Figura 2.3.6: Componentes de la radiación.

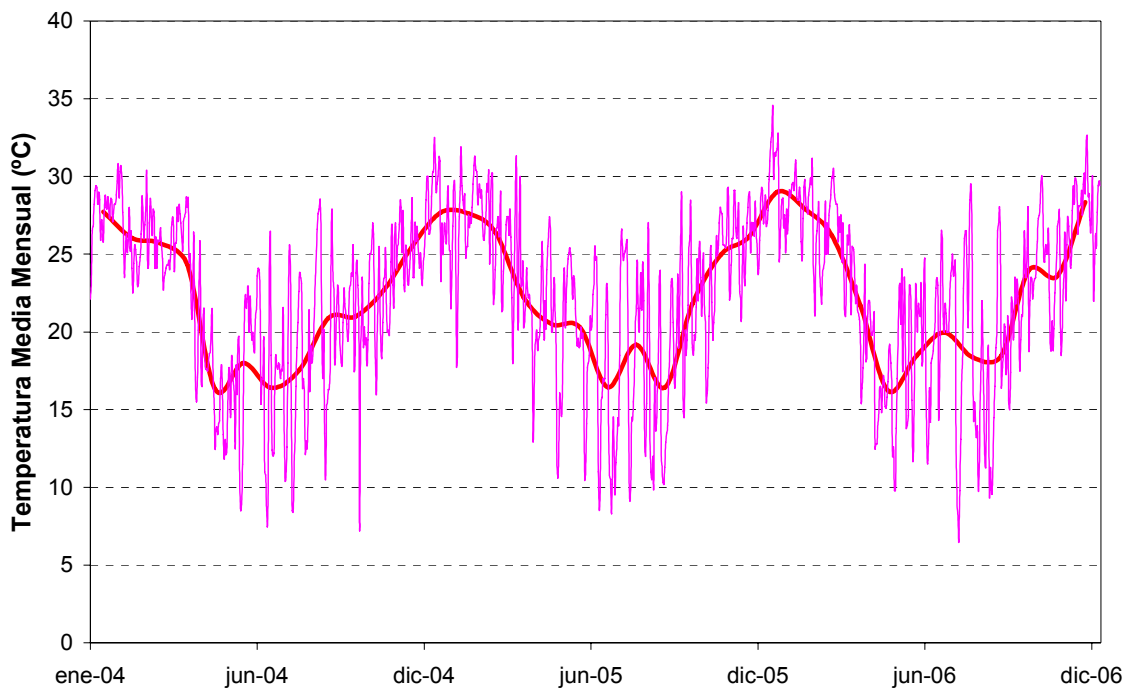


Figura 2.3.7: Serie de temperaturas para el período 2004-2006.

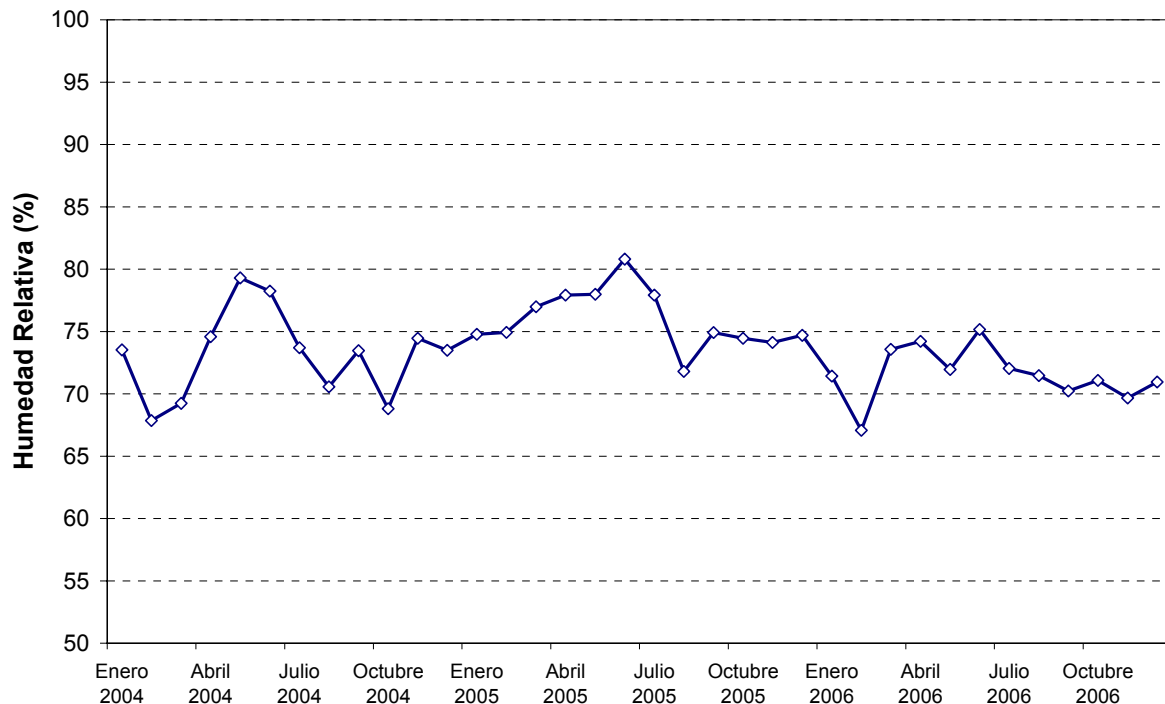


Figura 2.3.8: Serie de valores medios mensuales de humedad relativa para el período 2004-2006.

La Radiación Neta (R_n) se calcula como la resta entre R_{ns} y R_{nl} . En la Figura 2.3.9 se presenta la serie obtenida para el período 2004-2006.

2.3.4 Comparación

En la Figura 2.3.9 se muestra la serie temporal de evapotranspiración potencial calculada mediante el modelo explicado. A título comparativo, en la misma figura se presentan las series obtenidas mediante dos métodos simplificados, a saber, Thornthwaite⁸ y Penman-Montheit⁹, observándose compatibilidad entre ellos. Más abajo se analiza la sensibilidad de los resultados a esta elección de metodología de cálculo.

⁸ <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>

⁹ http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

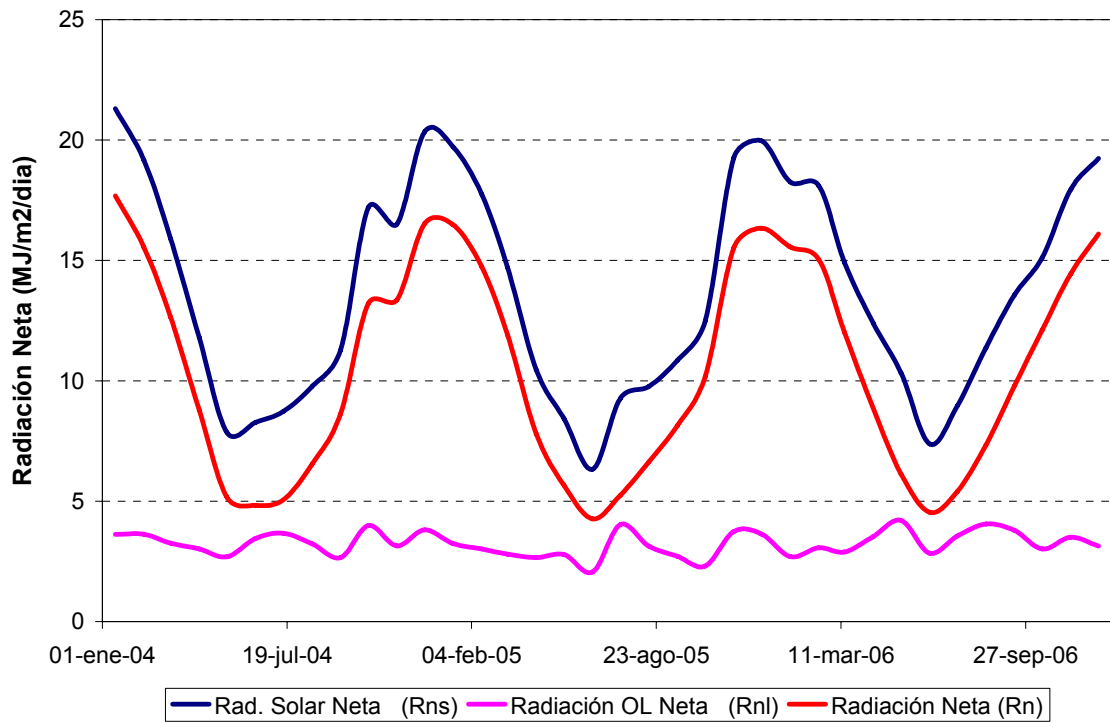


Figura 2.3.9: Serie de radiación neta para el período 2004-2006.

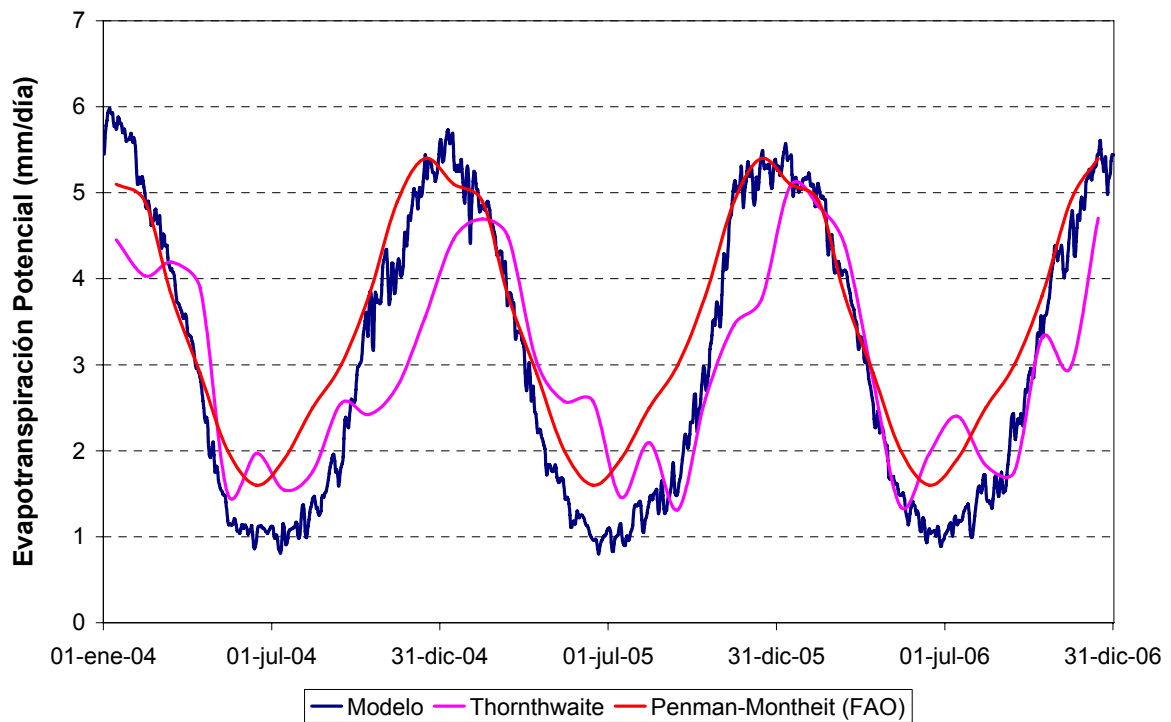


Figura 2.3.10: Evapotranspiración potencial para el período 2004-2006.

2.4 BALANCE VERTICAL

El balance vertical de agua se efectúa mediante el método SMA¹⁰ (“Soil Moisture Accounting”), que plantea una distinción entre 5 compartimientos, a saber (Figura 2.4.1):

- *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.
- *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.

Todos los compartimientos tienen una capacidad máxima de almacenamiento.

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 explica cómo se establecieron los valores de estos parámetros para el presente problema.

¹⁰ Bennett, T.H. and Peters, J.C., “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, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA

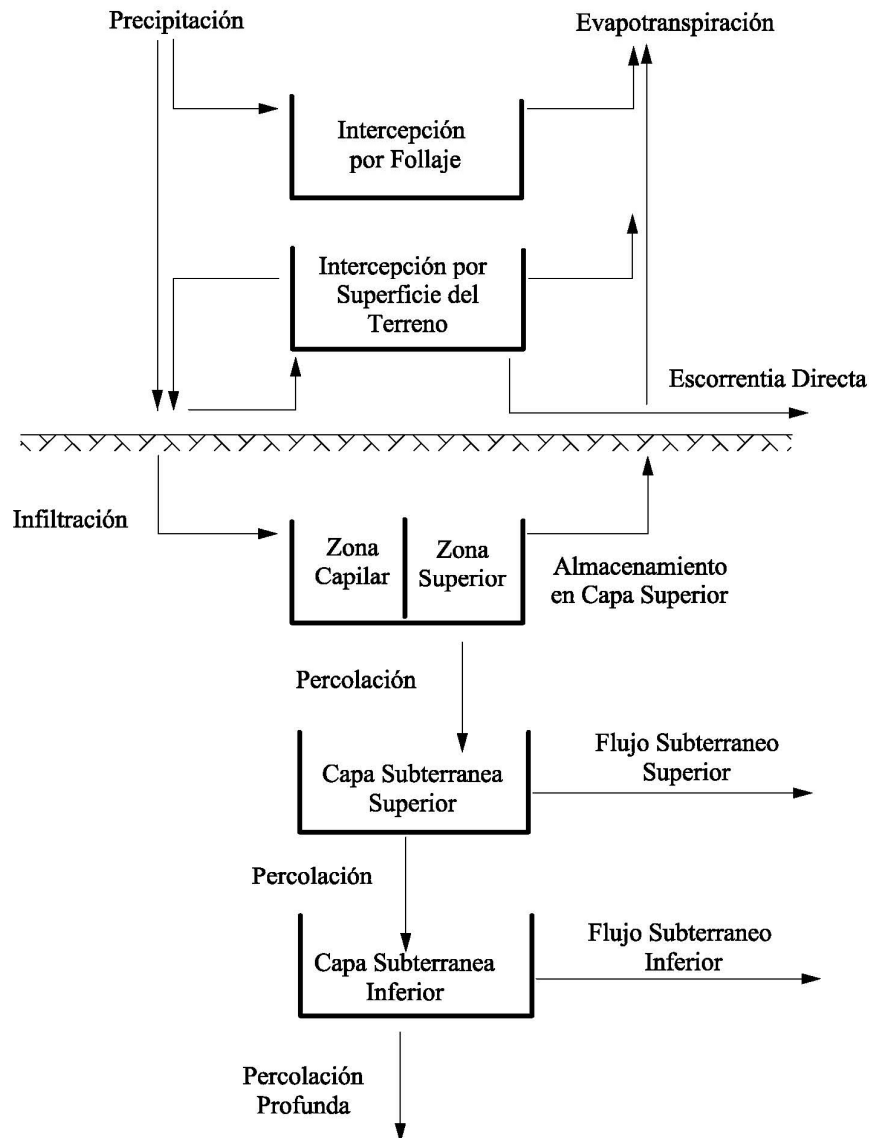


Figura 2.4.1: Esquema conceptual del SMA.

2.4.1 Almacenamientos máximos

El almacenamiento máximo en follaje (h_f) depende del tipo de vegetación. De acuerdo a lo indicado en la Tabla 2.4.1, se seleccionaron los siguientes valores para el presente problema:

- *Cultivos (yerba mate):* $h_f = 1$ mm (asociado a cultivos agrícolas)
- *Forestación:* $h_f = 9$ mm (asociado a bosque)
- *Pastizales:* $h_f = 3$ mm (asociado a herbazal)

Tabla 2.4.1: Almacenamiento máximo en follaje de acuerdo al 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) y de la pendiente. Teniendo en cuenta la Tabla 2.4.2, para el presente problema se tomó $h_d = 50$ mm, ya que la máxima pendiente en toda la cuenca es del 2,5%.

Tabla 2.4.2: Almacenamiento máximo en depresiones de acuerdo a la pendiente.

Descripción	Pendiente (%)	Almacenam.Sup.(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

Para estimar el almacenamiento máximo en el suelo es necesario disponer de una representación de la variación del espesor del manto de suelo a través de la cuenca. Tal como se mostró en el Primer Informe, ese espesor es del orden de los 3 m en la cuenca baja. Dado que en la cabecera de la cuenca se hacen evidentes los afloramientos de roca, el espesor se consideró prácticamente nulo en esa zona. Se supuso una variación lineal del espesor desde la cabecera hacia la salida de la cuenca, con lo que resultaron los espesores medios de suelo por subcuenca indicados en la Tabla 2.4.3.

Adicionalmente, el cálculo del almacenamiento máximo en el suelo depende de la porosidad del medio, ya que es el factor por el que hay que multiplicar al espesor. Se consideró que el suelo pertenece al grupo hidrológico C¹¹, es decir, se trata de marga areno-arcillosa¹², con lo que resulta una porosidad de 0,4 de acuerdo a la Tabla 2.4.4.

¹¹ Harza y Consorciados (CIDY), “Estudios Hidrogeológicos de arroyos, Hidrología de Arroyos, 1° Etapa”, 2° Informe de Avance, Volumen N° 5, Septiembre 1980

¹² “Urban Hydrology for Small Watersheds”, Natural Resource Conservation Service, Engineering Division, Department of Agriculture, USA, Technical Release-55, 1999.

Tabla 2.4.3: Capacidades del suelo de las subcuencas

ID	Nombre	Almac. Máx. Zona Sup. (m)	Almac. Máx. Capa Subt. (m)	Espesor Suelo (m)
1	Desembocadura	0,40	0,74	2,9
2	Divisa	0,40	0,68	2,7
3	Villa Dolores	0,41	0,52	2,3
4	Lapacho	0,40	0,38	2,0
5	Estepa	0,49	0,26	1,9
6	Intermedia	0,55	0,20	1,9
7	San Antonio	0,40	0,26	1,7
8	Santa Carla	0,44	0,13	1,4
9	San Ignacio	0,41	0,16	1,4
10	San José	0,41	0,10	1,3
11	Pelado	0,41	0,04	1,1
12	Santa Inés	0,38	0,00	0,9
13	Superior	0,35	0,00	0,5

Tabla 2.4.4: Porosidad y conductividad hidráulica para distintos tipos de suelo¹³.

Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelos			
Clase de Suelo	Porosidad	Porosidad efectiva	Conductividad hidráulica (cm/h)
Arena	0,437	0,417	11,78
Arena margosa	0,437	0,401	2,99
Marga arenosa	0,453	0,412	1,09
Marga	0,463	0,434	0,34
Marga limosa	0,501	0,486	0,65
Marga arenoarcillosa	0,398	0,330	0,15
Marga arcillosa	0,464	0,309	0,10
Marga limo--arcillosa	0,471	0,432	0,10
Arcilla arenosa	0,430	0,321	0,06
Arcilla limosa	0,479	0,423	0,05
Arcilla	0,475	0,388	0,03

La profundidad de las raíces de los pastizales es del orden del metro, mientras la correspondiente a la yerba mate y a la forestación es lo suficientemente profunda como para alcanzar el estrato basáltico, es decir, para cubrir todo el espesor de suelo. Entonces, para determinar el almacenamiento máximo de la Zona Superior en las subcuencas cuyo espesor supera el metro, se efectuó un promedio entre 1 m, ponderado por el área de pastizales, y el espesor total de suelo, ponderado por el área restante. Para las subcuencas de espesor menor al metro, la Zona Superior se asoció directamente a la totalidad del espesor. Los valores resultantes por subcuenca se presentan en la Tabla 2.4.3.

Con respecto al almacenamiento máximo en la Zona Capilar de la capa superior de suelo, este fue estimado en 30 mm a partir de la regla de reconocimiento mostrada en la Tabla 2.4.5.

¹³ Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", Maidment, Mays, 1994

Tabla 2.4.5: 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

Donde existe una capa subterránea (espesores de suelo mayores a los correspondientes a la Zona Superior), sólo se consideró una capa superior (en rigor, se tomó una capa inferior de espesor despreciable, sin percolación, de modo de representar la impermeabilidad del manto basáltico). Su espesor fue tomado como igual al resto del manto de suelo. Los valores por subcuenca se presentan en la Tabla 2.4.3.

2.4.2 Infiltración/percolaciones máximas

En base a la Tabla 2.4.6, y teniendo en cuenta que se trata de suelo del grupo hidrológico C, la infiltración máxima se consideró de 2,5 mm/h.

Tabla 2.4.6: Infiltración máxima por tipo de suelo¹⁴.

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) se tomó igual a la conductividad hidráulica, para cuya estimación se tuvo en cuenta la Tabla 2.4.7. Se consideró que la infiltración es muy lenta, seleccionándose el valor de 0,5 mm/h.

¹⁴ “Urban Hydrology for Small Watersheds”, Natural Resource Conservation Service, Engineering Division, Department of Agriculture, USA, Technical Release-55, 1999.

Tabla 2.4.7: 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

2.4.3 Tiempo de retardo

Para la estimación del tiempo de retardo se tuvieron en cuenta observaciones efectuadas en las cuencas del A° Yacarey y del A° del Medio, consideradas comparables a la del Zaimán, que indican que "...48 horas después de producida una precipitación de 52 mm, aún se advierte un importante escurrimiento superficial."¹⁵. En consecuencia, el tiempo de retardo se tomó igual a 50 horas.

2.4.4 Impermeabilidad

En la Tabla 2.3.2 se muestra el porcentaje de impermeabilidad por subcuenca, obtenido a partir de la caracterización del uso del suelo efectuada más arriba.

2.5 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Para el transporte de la escorrentía superficial se utiliza el método del hidrograma unitario del SCS¹⁶. Este requiere especificar el tiempo de retardo, sugiriendo su estimación como el 60% del tiempo de concentración de la cuenca. Este se calculó utilizando la fórmula de Kirpich¹⁷, de donde surgieron los valores por subcuenca mostrados en la Tabla 2.5.1.

¹⁵ Harza y Consorciados (CIDY), "Estudios Hidrogeológicos de arroyos, Hidrología de Arroyos, 1° Etapa", 2° Informe de Avance, Volumen N° 5, Septiembre 1980.

¹⁶ Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", Maidment, Mays, 1994

¹⁷ Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", Maidment, Mays, 1994

Tabla 2.5.1: Escalas de tiempo de las subcuencas.

ID	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)
1	129	77
2	66	40
3	80	48
4	73	44
5	159	95
6	141	85
7	60	36
8	51	31
9	70	42
10	56	34
11	120	72
12	78	47
13	120	72

2.6 FLUJO DE BASE

El transporte del flujo de base se efectúa mediante el método del reservorio lineal¹⁸, que requiere la especificación del tiempo de retardo. Este se tomó igual al tiempo de retardo subterráneo, es decir, 50 horas.

2.7 FLUJO CONCENTRADO

2.7.1 Geometría

En la Figura 2.7.1 se indica la ubicación de las 38 secciones transversales utilizadas para representar la geometría del A° Zaimán, a lo largo de 18,25 km desde su desembocadura. Aquellas asociadas a puntos centrales amarillos corresponden a secciones transversales disponibles de estudios anteriores (ver Primer Informe), mientras que las asociadas a puntos centrales rojos constituyen secciones construidas para este estudio.

La construcción de secciones transversales se efectuó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Definida la ubicación y dirección del corte, se obtuvo el perfil de terreno que surge de cortar el MDT. Esto se considera representativo de la planicie de inundación.
- El cauce principal se definió esquemáticamente, en base a un ancho, profundidad e inclinación de taludes estimados de observaciones durante las campañas de reconocimiento (ver Primer Informe).

En realidad, las propias secciones transversales disponibles fueron reconstruidas con este procedimiento para lograr compatibilidad con la base de información generada en el presente estudio.

¹⁸ Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", Maidment, Mays, 1994

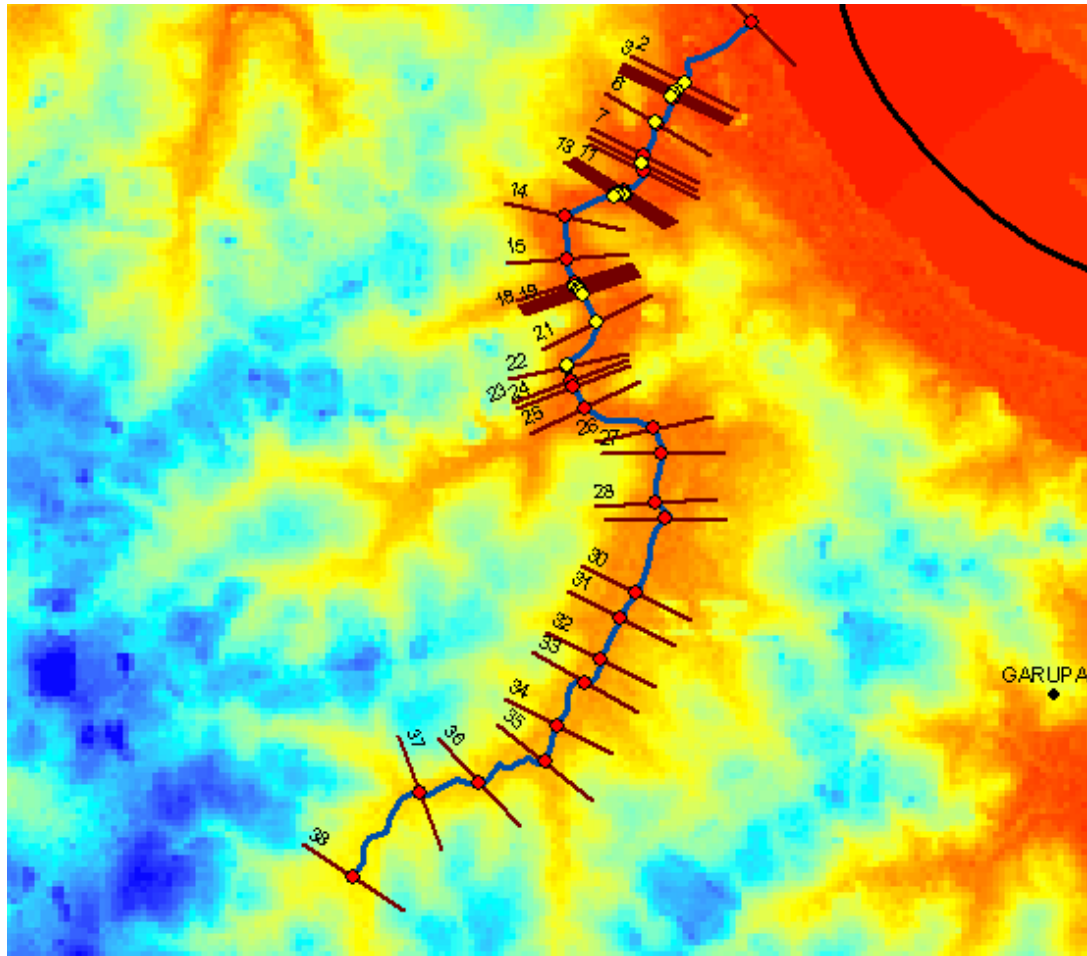
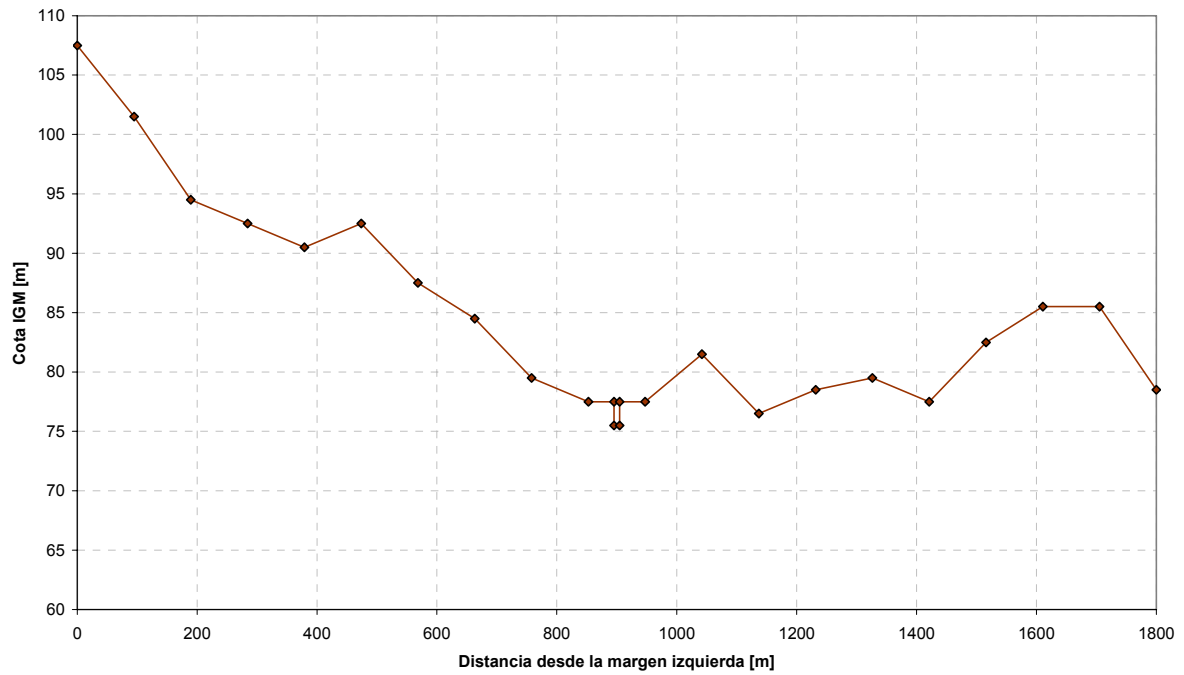


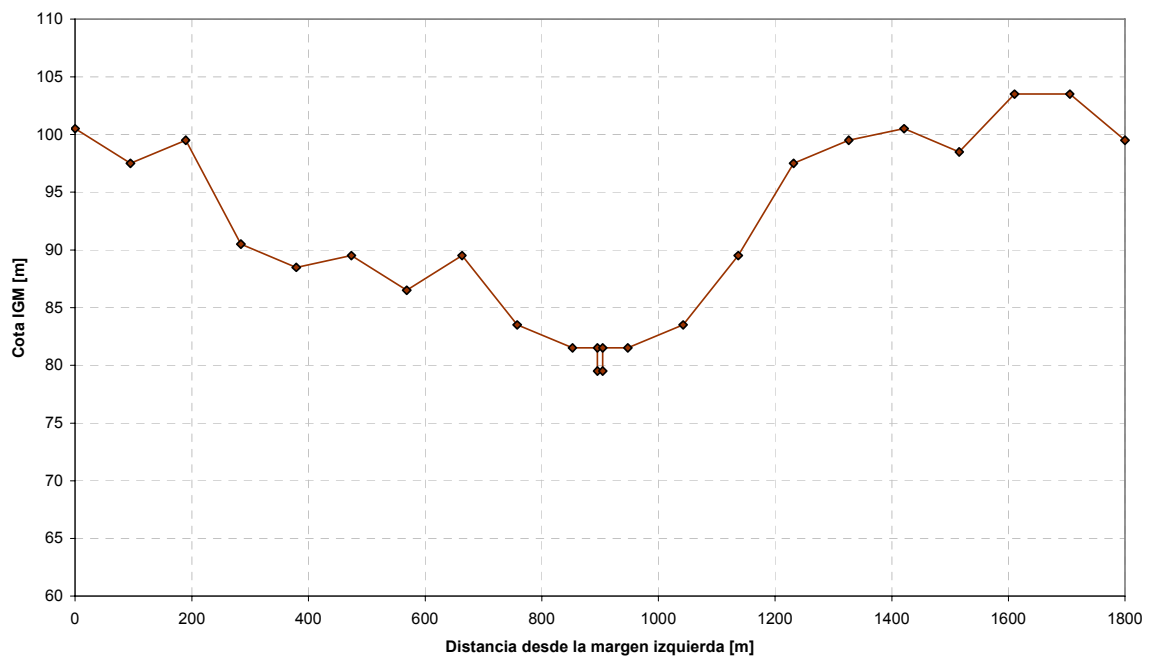
Figura 2.7.1: Trazas de secciones transversales del modelo hidráulico del A° Zaimán (con el MDT como fondo). Las marcadas con un punto amarillo se corresponden con secciones antecedentes; las marcadas en rojo constituyen nuevas secciones.

La ubicación de las secciones construidas se definió de modo de tener una densidad adecuada y relativamente equilibrada a lo largo del arroyo. Nótese que no todas las direcciones de las trazas de secciones transversales son normales a la dirección del cauce principal (Figura 2.7.1). Esto se hizo así para evitar cruces de secciones y el consiguiente cómputo errado de volúmenes de agua.

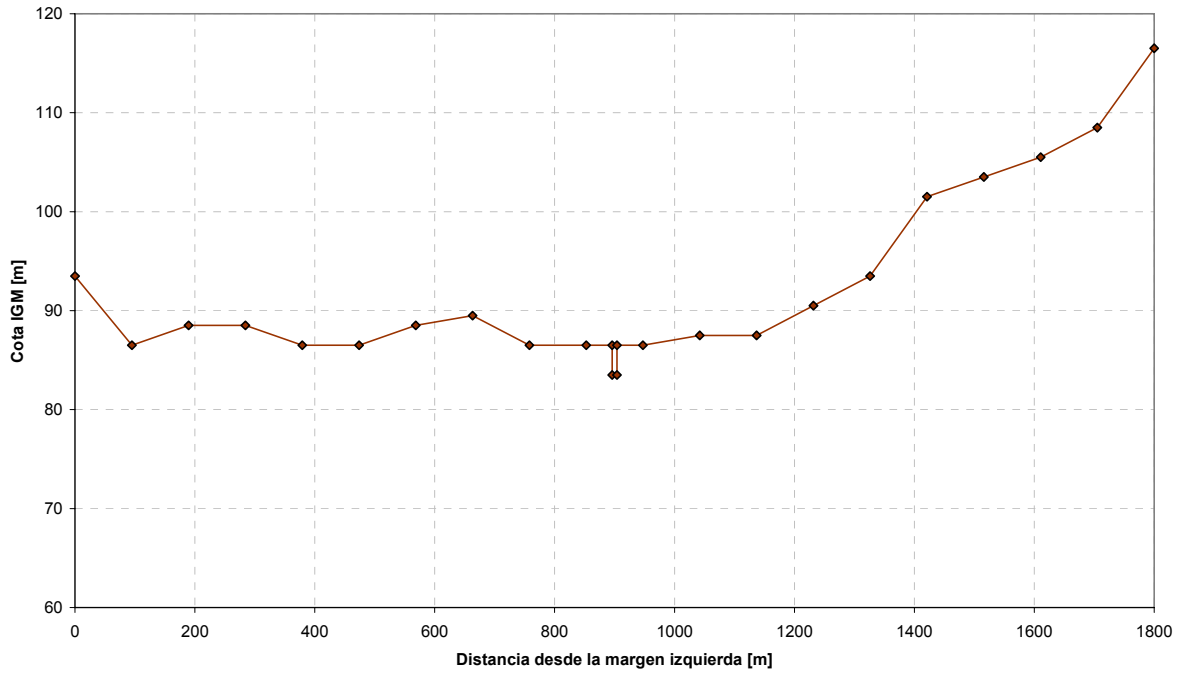
A título ilustrativo, en la Figura 2.7.2 se muestran algunas secciones transversales. Por su parte, en la Figura 2.7.3 se presentan comparaciones entre algunas secciones reconstruidas y originales; se observa una consistencia general satisfactoria.



a) Sección 1

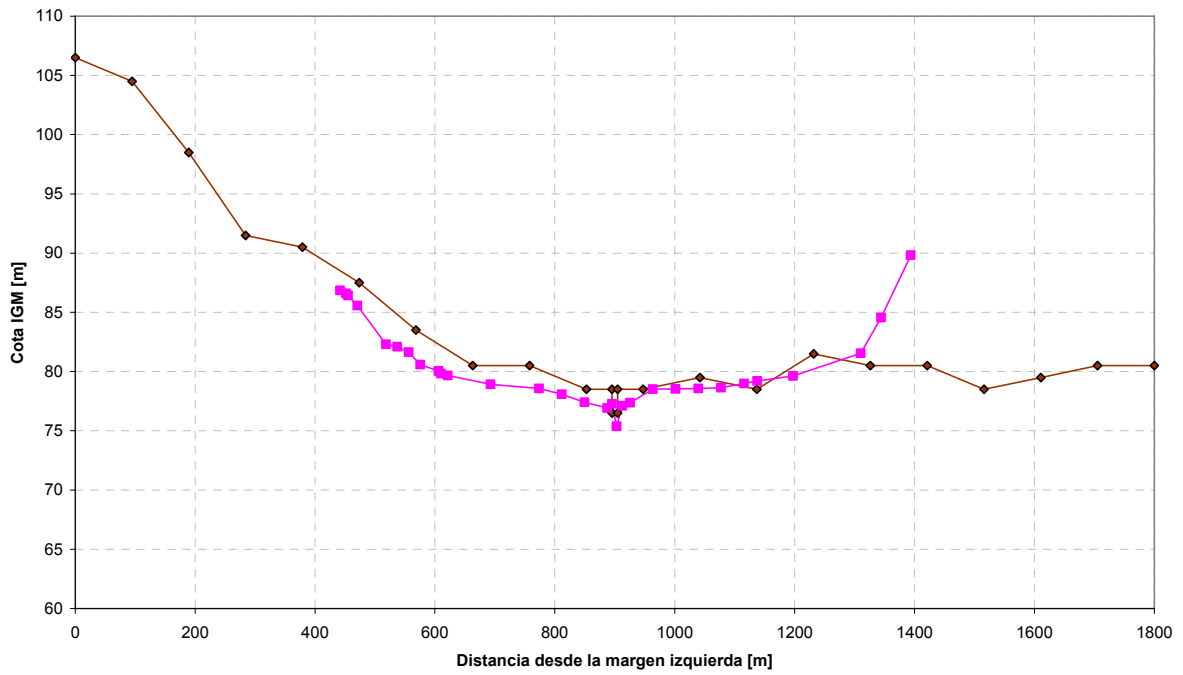


b) Sección 14

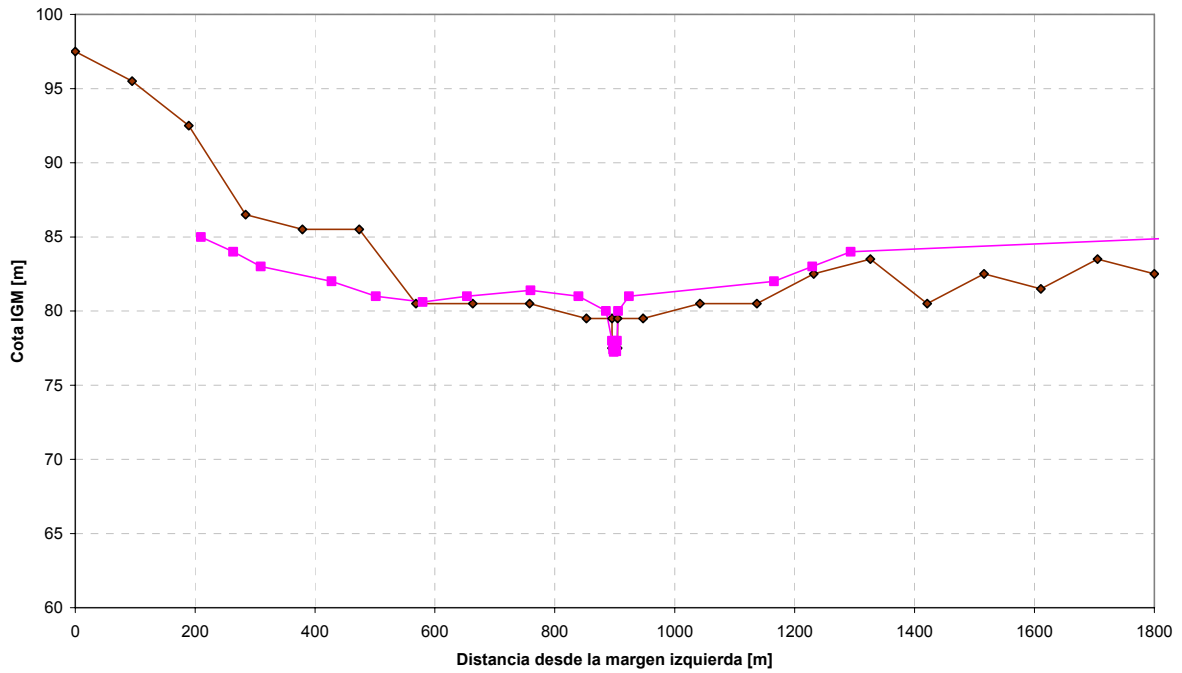


c) Sección 25

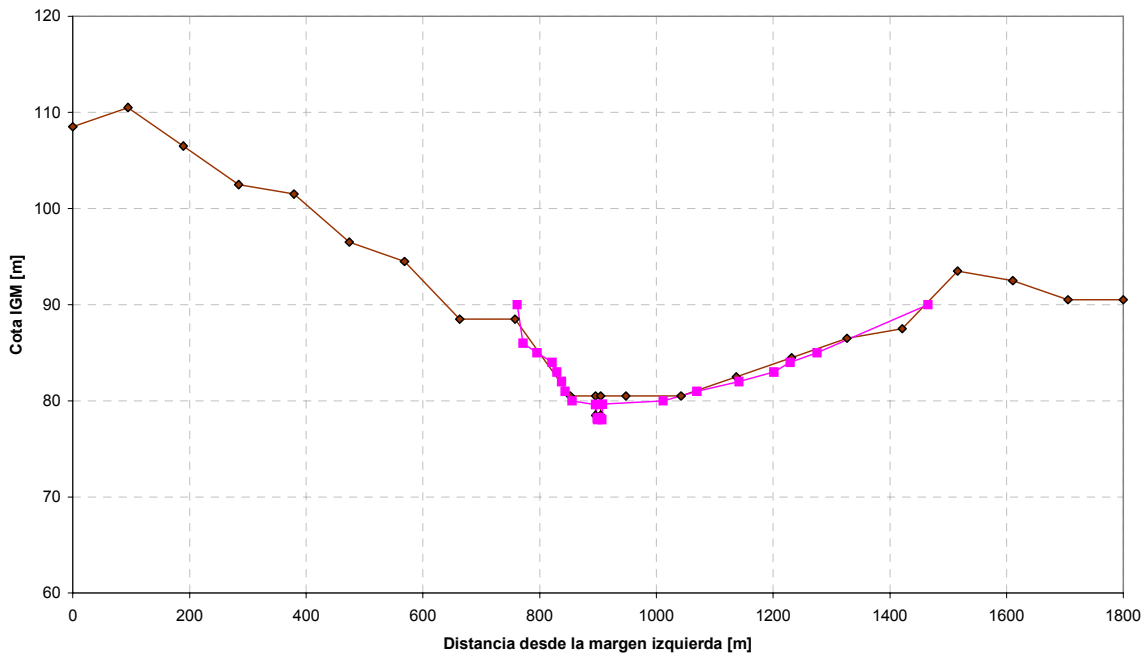
Figura 2.7.2: Secciones transversales.



a) Sección 3



b) Sección 8



c) Sección 13

Figura 2.7.3: Secciones transversales reconstruidas. En morado se indica la sección transversal original.

2.7.2 Forzantes

El flujo concentrado está forzado por el aporte de caudal desde las subcuencas de los arroyos que desembocan en él, calculados con el modelo hidrológico. En la Figura 2.7.4 se muestran las subcuencas y los puntos de aporte de caudal en el modelo.

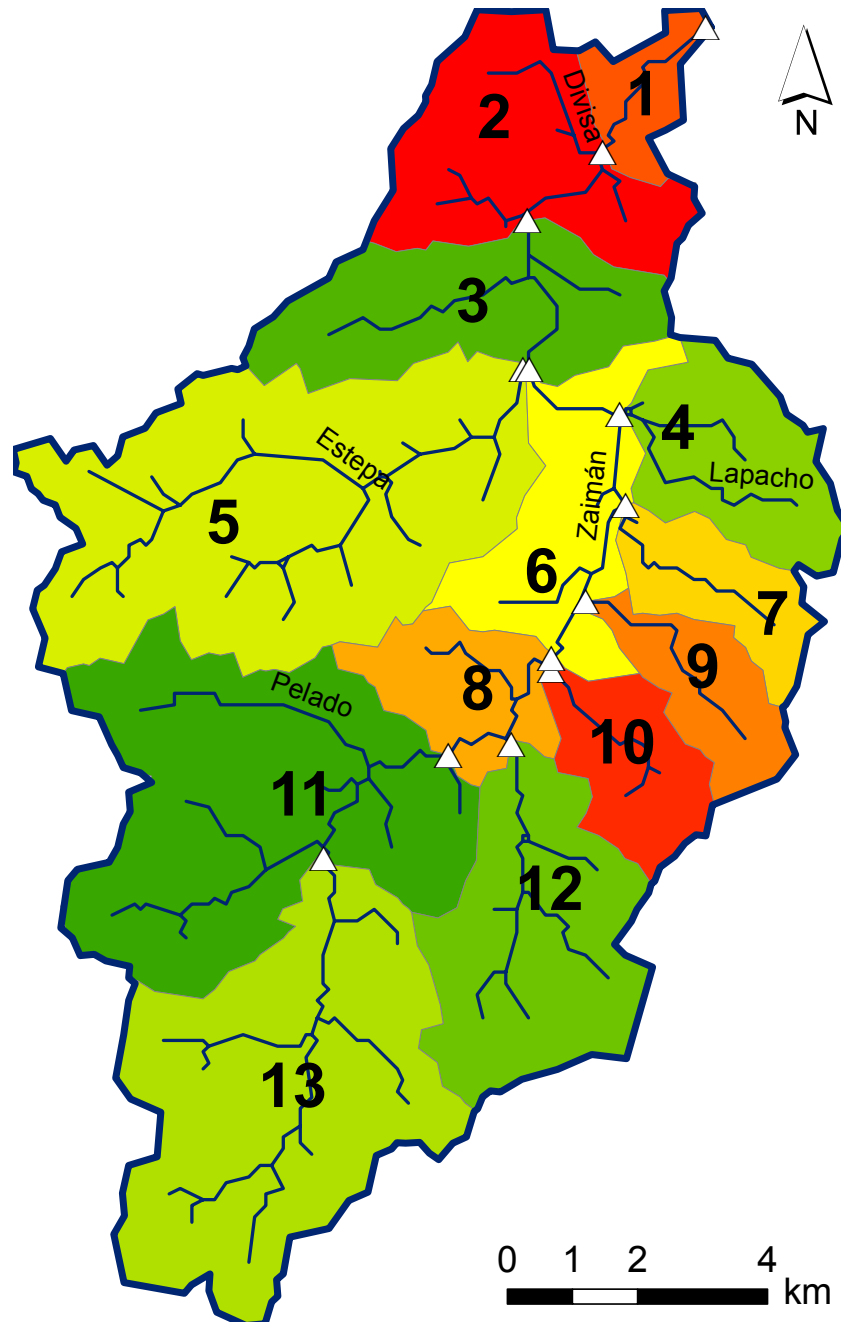


Figura 2.7.4: Subcuencas y puntos de aporte de caudal al A° Zaimán.

2.7.3 Condicionantes

El flujo concentrado está condicionado por la resistencia hidráulica, por el nivel del embalse de Yacyretá y por la presencia de estructuras viales (puentes).

La resistencia hidráulica se parametriza en términos de la rugosidad del cauce, representada por el coeficiente de Manning. En base a observaciones y comparación con casos tabulados¹⁹ se establecieron para este coeficiente los valores mostrados en la Tabla 2.7.1.

Tabla 2.7.1: Conductividad hidráulica de acuerdo a las características de filtración.

Zona de Cuenca	Cauce principal	Planicie
Alta	0,040	0,050
Baja	0,045	0,050

El nivel del embalse de Yacyretá produce un efecto de remanso sobre el arroyo. En la Figura 2.7.5 se muestra, a título ilustrativo, el nivel del embalse para el período 2002-2006. Allí se observa el cambio de cota operado desde el segundo trimestre de 2006.

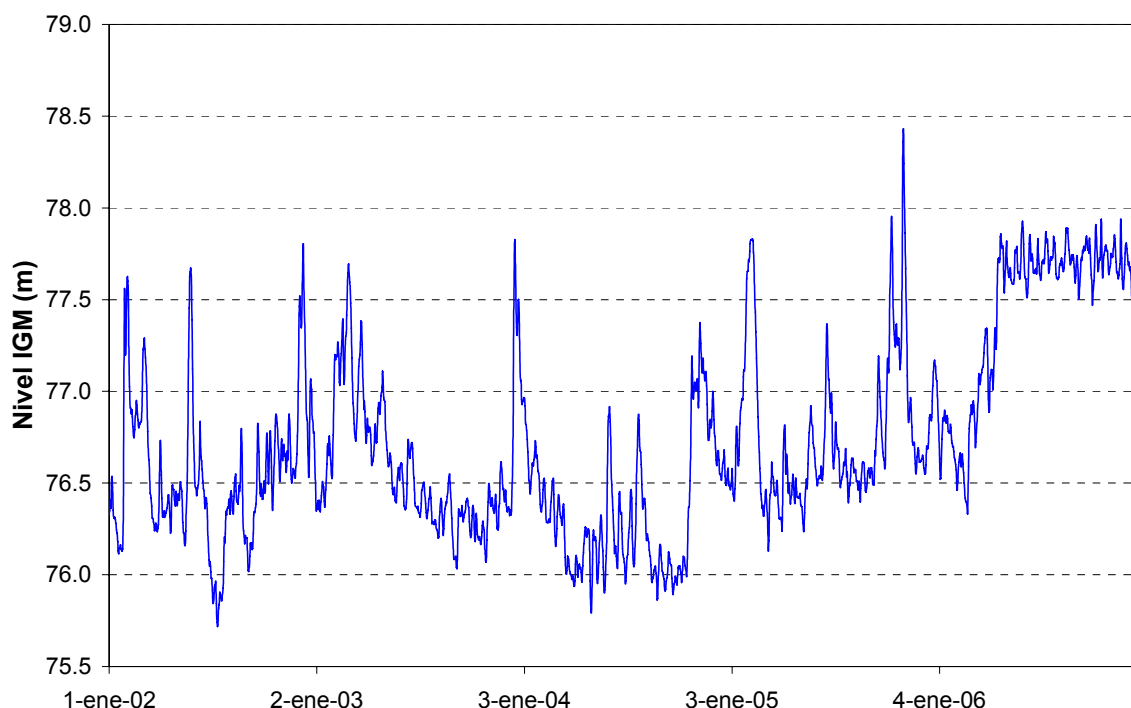


Figura 2.7.5: Serie de niveles del embalse para el período 2002-2006.

¹⁹ Ven Te Chow , “Open Channel Hydraulics”, McGraw-Hill, 1959.

La Figura 2.7.6 presenta la ubicación de los cuatro puentes existentes sobre el A° Zaimán. En el modelo se representaron los correspondientes a la Ruta Nacional N° 12 y a la Av. Cabo de Hornos, que son los más significativos y para los cuales se dispuso de todos los datos geométricos. Aguas arriba de éstos se encuentran dos puentes de mucha menor envergadura (puentes de madera y de hormigón ‘El Porvenir’), que no fueron representados ya que la perturbación que ellos pueden producir sobre el flujo es básicamente local (un ensayo de sensibilidad efectuado a posterior con el modelo calibrado verificó esta aseveración).

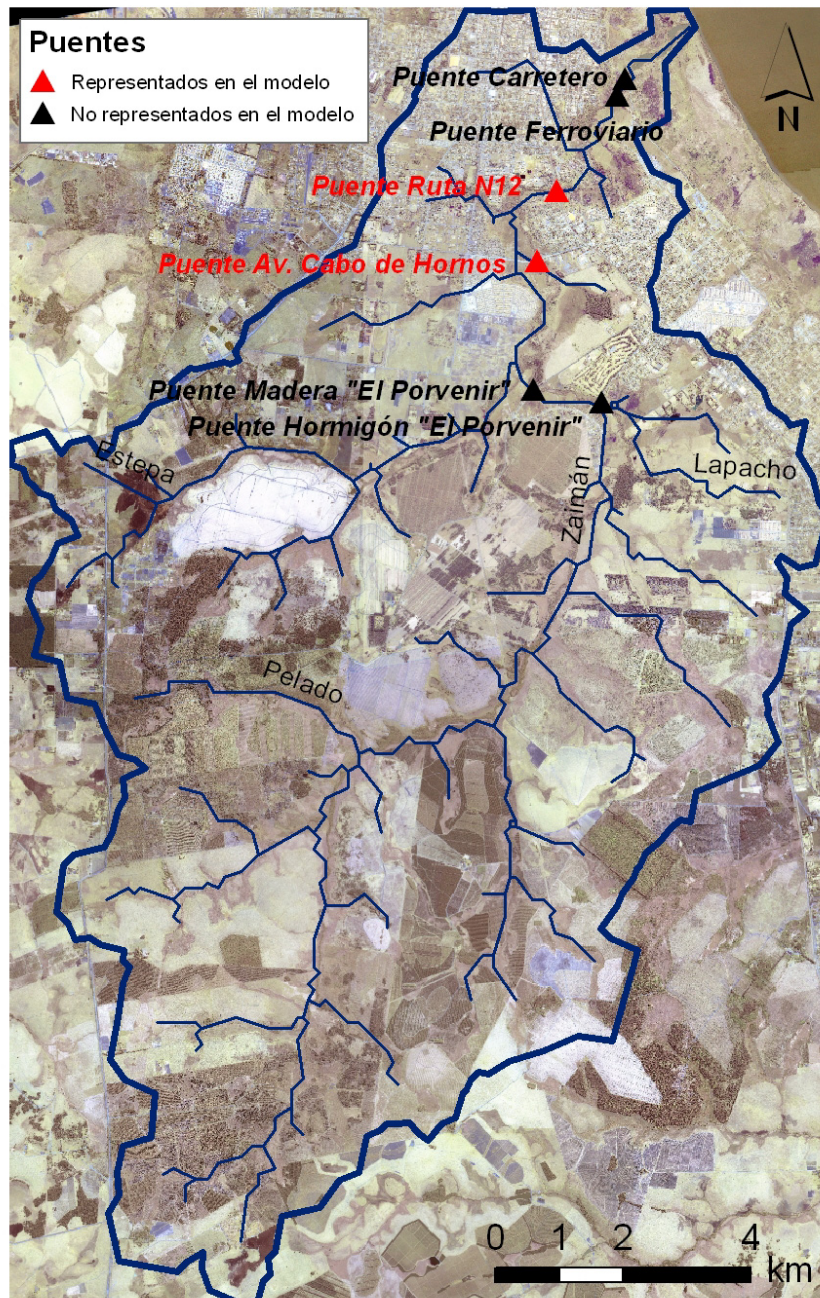
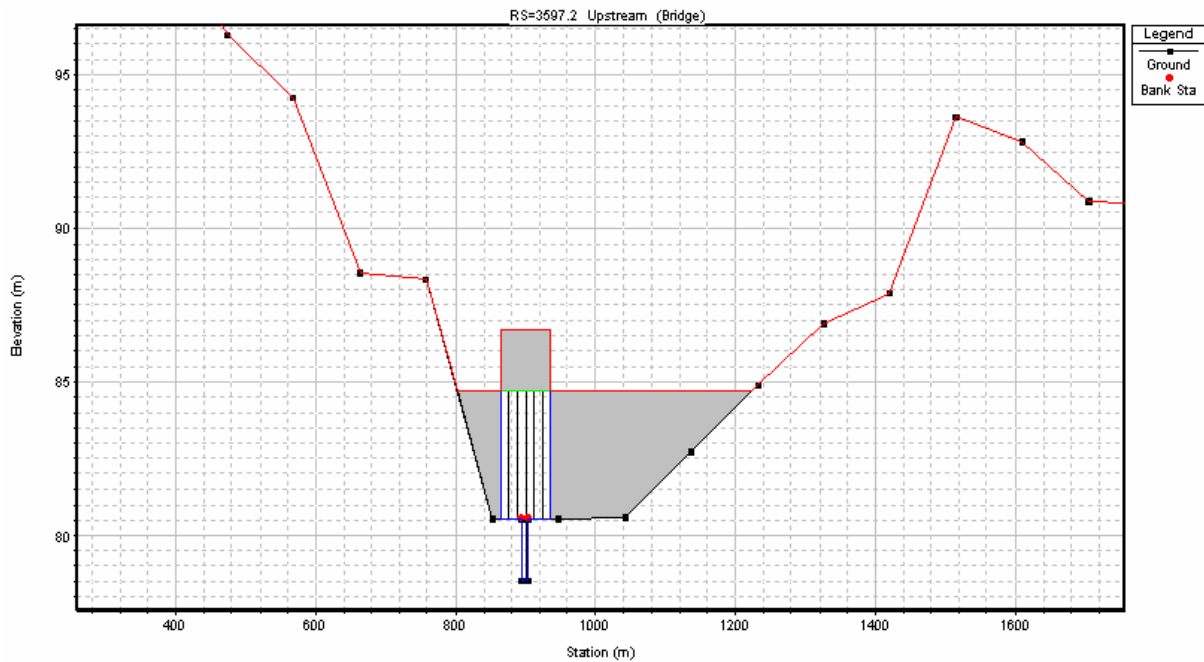


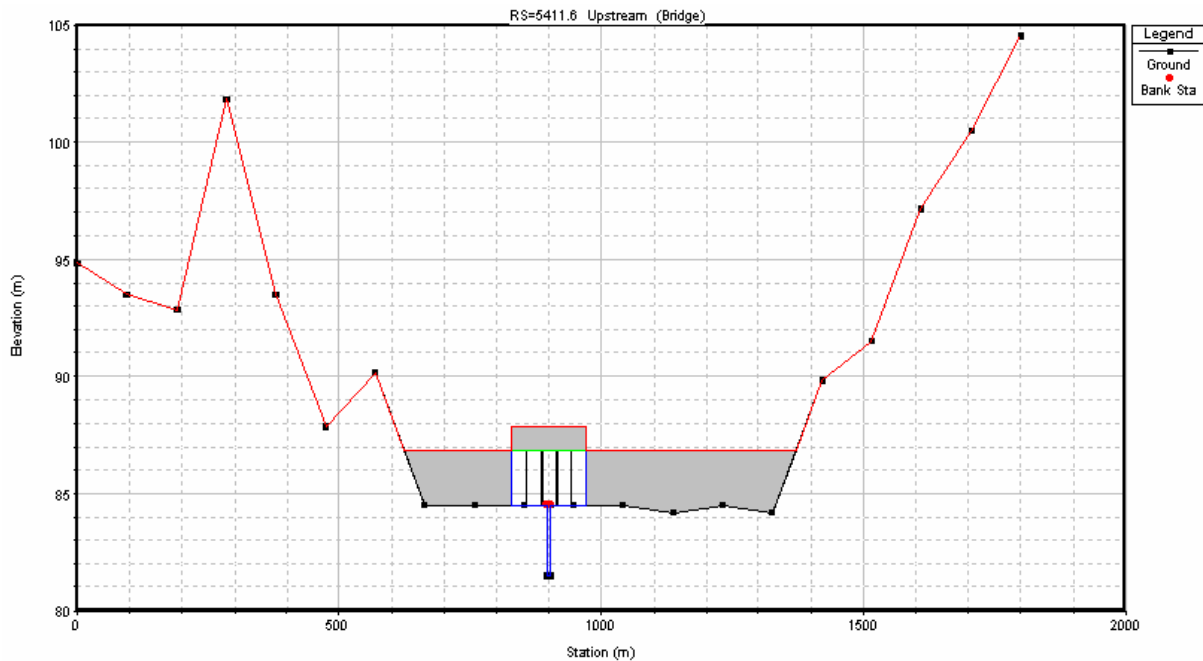
Figura 2.7.6: Ubicación de puentes sobre el A° Zaimán.

A continuación se describen los dos puentes principales y se explica su representación esquemática en el modelo:

- *Puente sobre Ruta Nacional N° 12:* Se trata de dos puentes paralelos, cada uno con un sentido de circulación, cuya luz total es de 70 m. El ubicado aguas abajo, de mayor antigüedad, tiene 6 vanos de 11,7 m de ancho entre eje y eje de pila. El más moderno, ubicado aguas arriba, tiene 4 vanos de 17,5 m. La cota inferior de las vigas es 84,5 m para el antiguo y 85,7 m para el moderno. En el modelo sólo se representó el puente antiguo, ya que es el que ofrece mayor resistencia (Figura 2.7.7a). Las pilas se consideraron de 1 m de espesor.
- *Puente sobre Av. Cabo de Hornos:* La luz total es de 140 m, con 5 vanos de 28 m entre eje y eje de pila. Las pilas son de 1,40 m de espesor. Se estimó una cota inferior de vigas de 86,8 m (Figura 2.7.7b).



a) Ruta Nacional N° 12



b) Av. Cabo de Hornos

Figura 2.7.7: Esquemización de puentes sobre el A° Zaimán.

2.7.4 Pasos de discretización

El arroyo se discretizó con un paso espacial (Δx) de 50 m. Esto significa que se resuelve con 366 nodos, una resolución relativamente alta.

Para representar la onda de inundación con precisión, es necesario que el paso temporal (Δt) cumpla con la siguiente condición

$$\Delta t \sim \Delta x / c$$

donde c es la celeridad de la onda. Por tratarse de ondas tipo cinemáticas, esta celeridad es del orden de la velocidad de flujo. Estimándola en 3 m/s, resulta que el paso temporal debe ser del orden de 10 segundos. El valor utilizado para las simulaciones fue de 2 segundos, con lo cual se garantiza la estabilidad.

3 RESULTADOS

3.1 PRODUCCIÓN DE SUBCUENCAS

3.1.1 Implementación básica

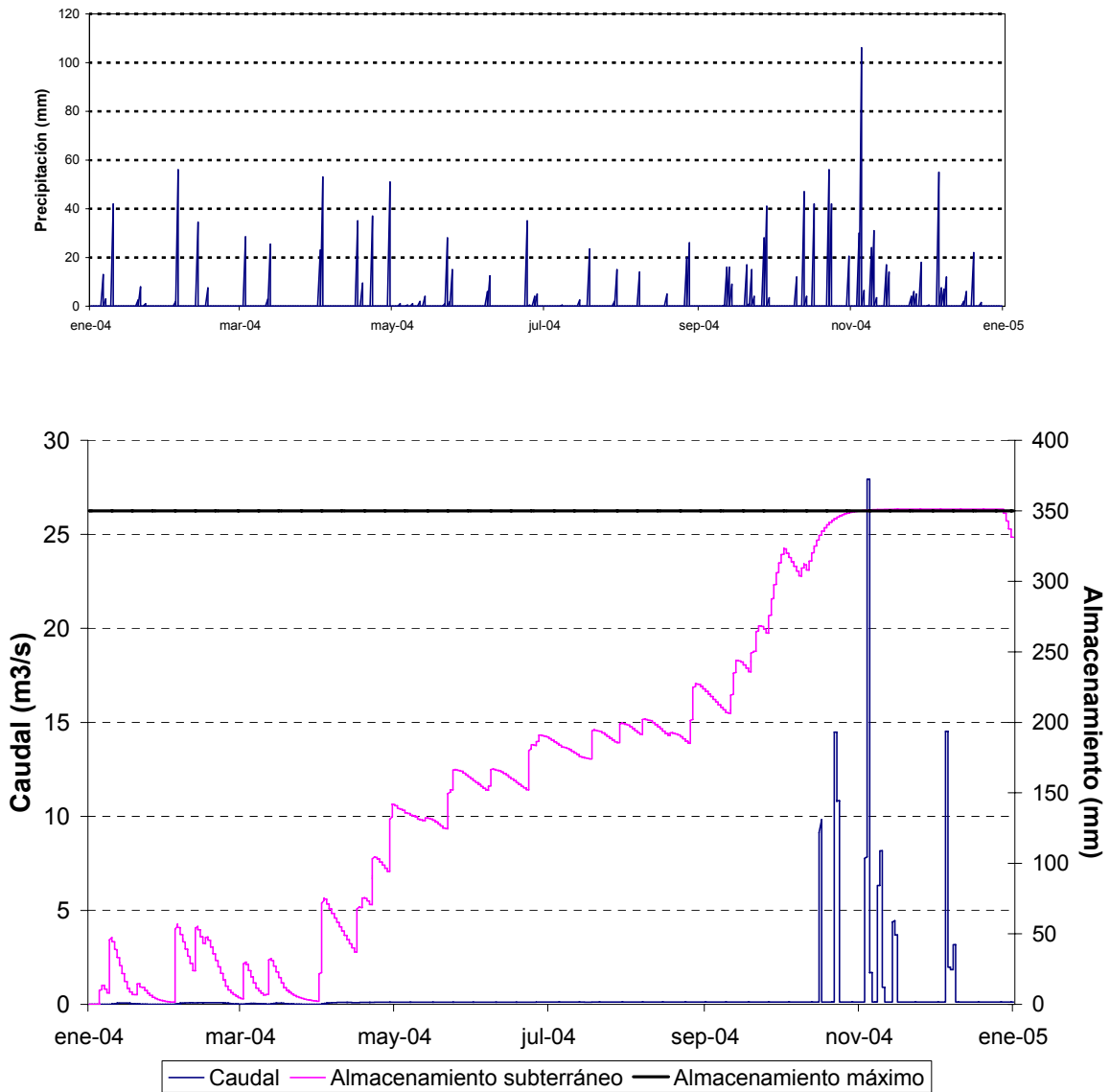
En la Figura 3.1.1 se muestran los hidrogramas resultantes para las subcuencas 13 (representativo de la zona alta – subcuencas 12 y 13), 9 (representativo de la zona media – subcuencas 5 a 11) y 2 (representativo de la zona baja – subcuencas 1 a 4), correspondientes al escenario de prueba. Allí también se representa la evolución temporal del almacenamiento subterráneo (suma de los correspondientes a las distintas capas de suelo), que para este escenario de prueba se supuso nulo en el instante inicial del año.

Para la zona alta (Figura 3.1.1a) se observa que se produce una continua infiltración, que impide el desarrollo de escorrentía superficial, y que lleva al continuo crecimiento del almacenamiento subterráneo, sin que éste alimente un flujo de base significativo. Este proceso continúa, hasta que con la sucesión de precipitaciones intensas más frecuentes que tienen lugar desde mediados de setiembre, se alcanza la saturación del suelo, que conduce a pulsos de escorrentía superficial cada vez que tienen lugar precipitaciones. Hacia el final del año se avizora el comienzo de la caída del almacenamiento subterráneo, ante la merma en las precipitaciones.

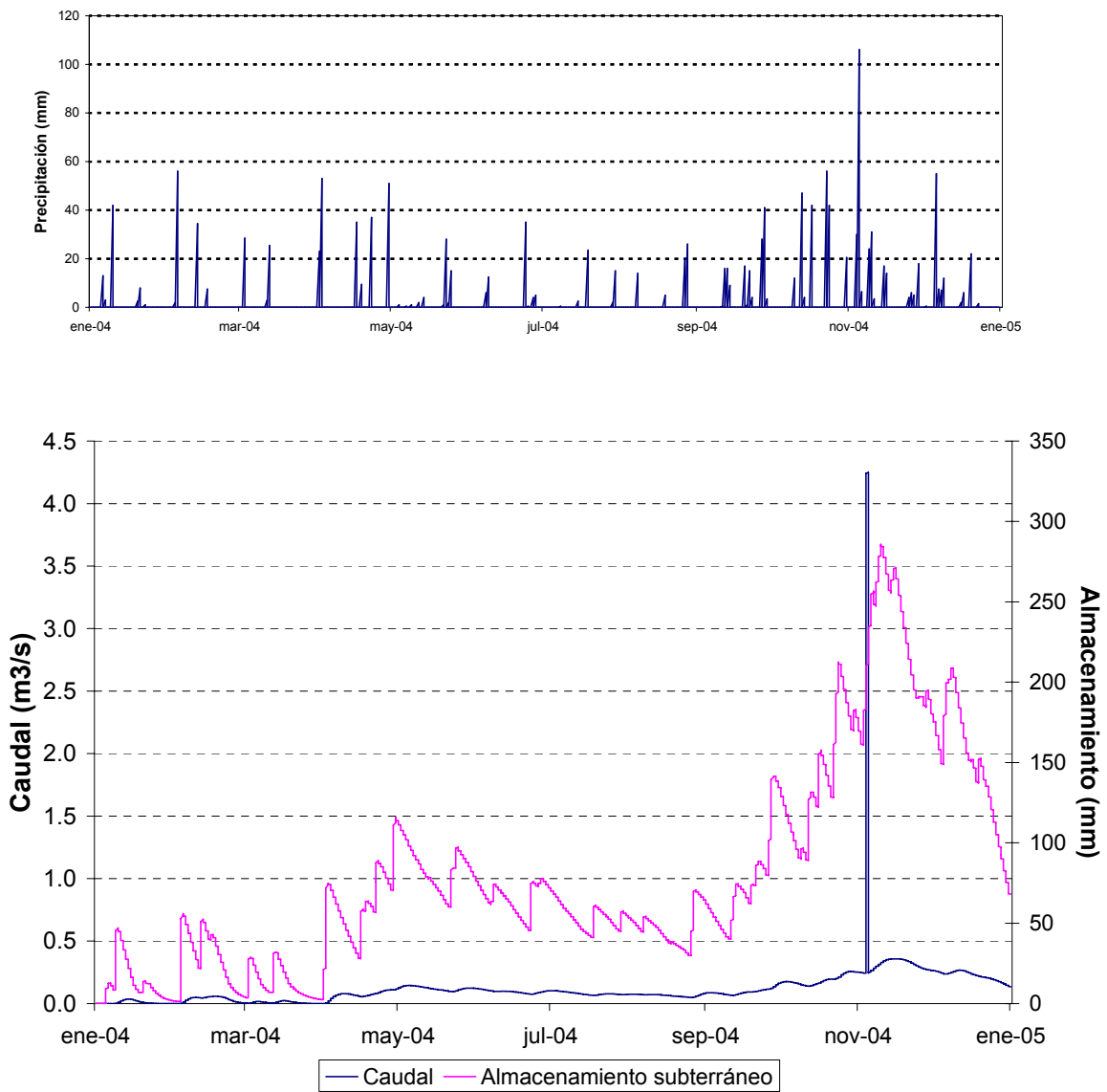
En el caso de la zona media (Figura 3.1.1b), hacia abril se alcanza un nivel medio de almacenamiento que da lugar a un flujo de base a la salida. Con la llegada de la época de precipitaciones intensas frecuentes el almacenamiento crece, pero permanece muy por debajo del valor de saturación (570 mm para la subcuenca 9). El pico de precipitación más intenso de principios de noviembre (106 mm) no logra infiltrar totalmente, produciendo un pulso de escorrentía superficial.

Para la zona baja (Figura 3.1.1c) la respuesta es similar a la de la zona media, pero con el agregado de que casi todos los picos de precipitación intensos dan lugar a pulsos de escorrentía superficial.

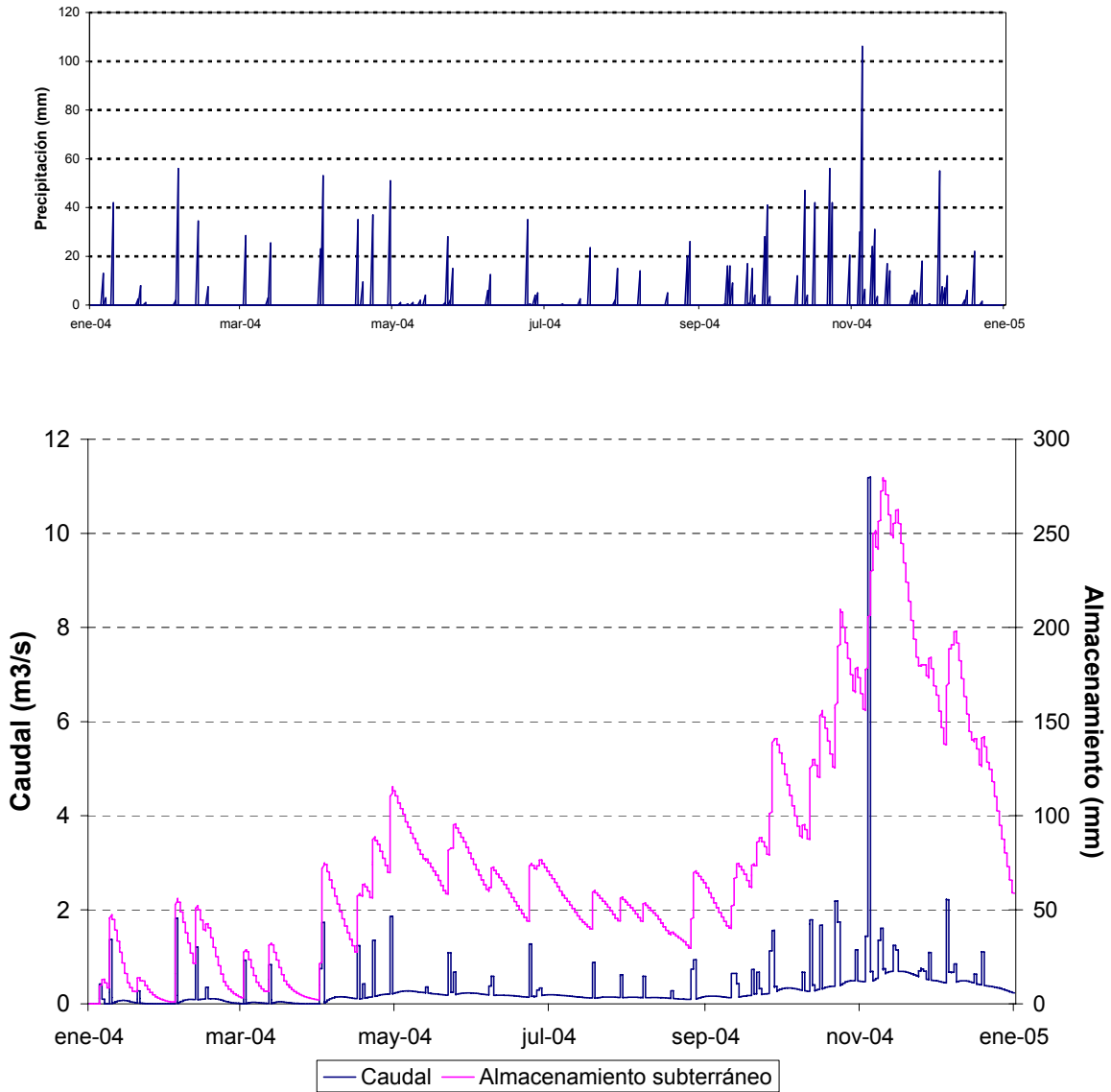
Estos resultados parecen indicar que las subcuencas entran en régimen luego de aproximadamente cuatro meses, es decir, que esa es la escala de tiempo del transitorio. Para verificar esta conclusión se llevó a cabo un ensayo con un histograma periódico constituido por pulsos diarios uniformes de precipitación cada 15 días, que suman entre todos la misma precipitación anual del 2004, el cual fue repetido durante tres años. En la Figura 3.1.2 se muestran los datos y resultados obtenidos para la subcuenca del Estepa (#5), donde a simple vista se verifica la entrada en régimen del sistema luego de unos pocos meses, ya que la respuesta se repite periódicamente a partir de allí. Para cuantificar esta duración, en la Figura 3.1.3 se presenta la diferencia entre resultados del primero y segundo ciclo anual para el caudal y el almacenamiento, observándose que, efectivamente, la diferencia se hace despreciable luego de 4 meses.



a) Subcuenca 13 (Superior)



b) Subcuenca 9 (San Ignacio)



c) Subcuenca 2 (Divisa)

Figura 3.1.1: Hidrogramas al pie de las subcuencas

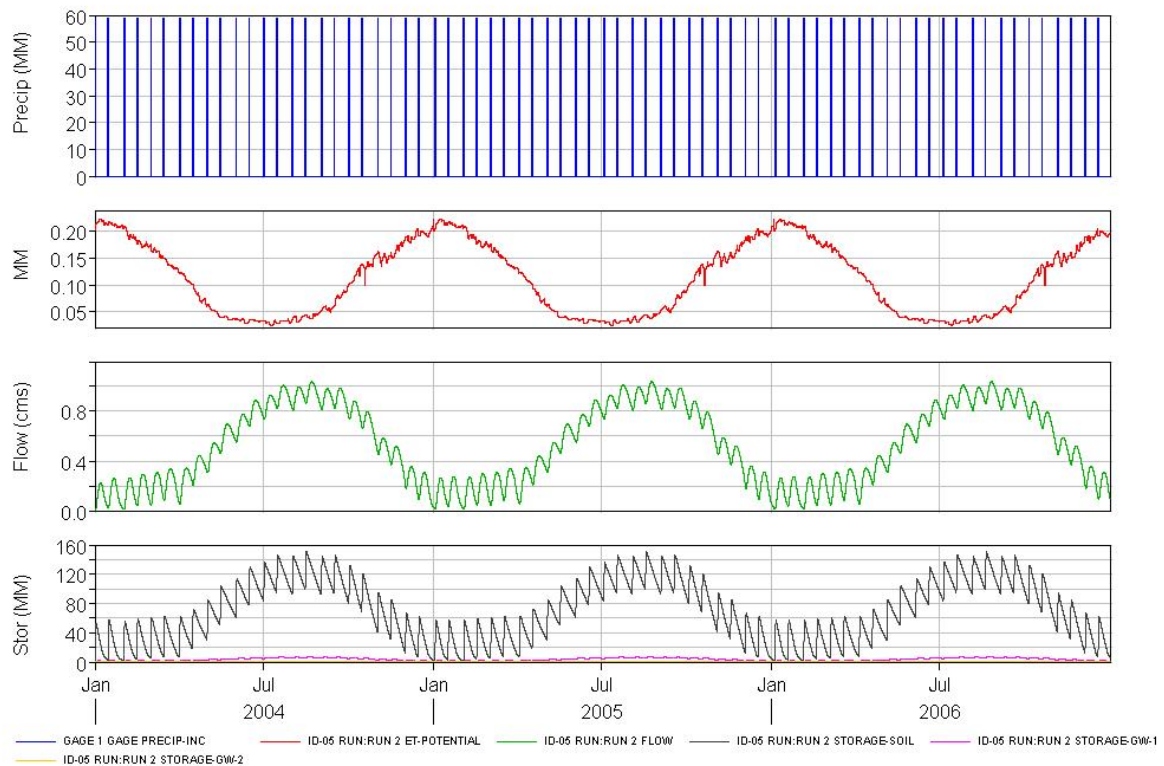


Figura 3.1.2: Escenario de prueba con histograma periódico. En orden de arriba hacia abajo se representan la precipitación, la evapotranspiración potencial, y el caudal y el almacenamiento subterráneo para la subcuenca del Estepa (#5).

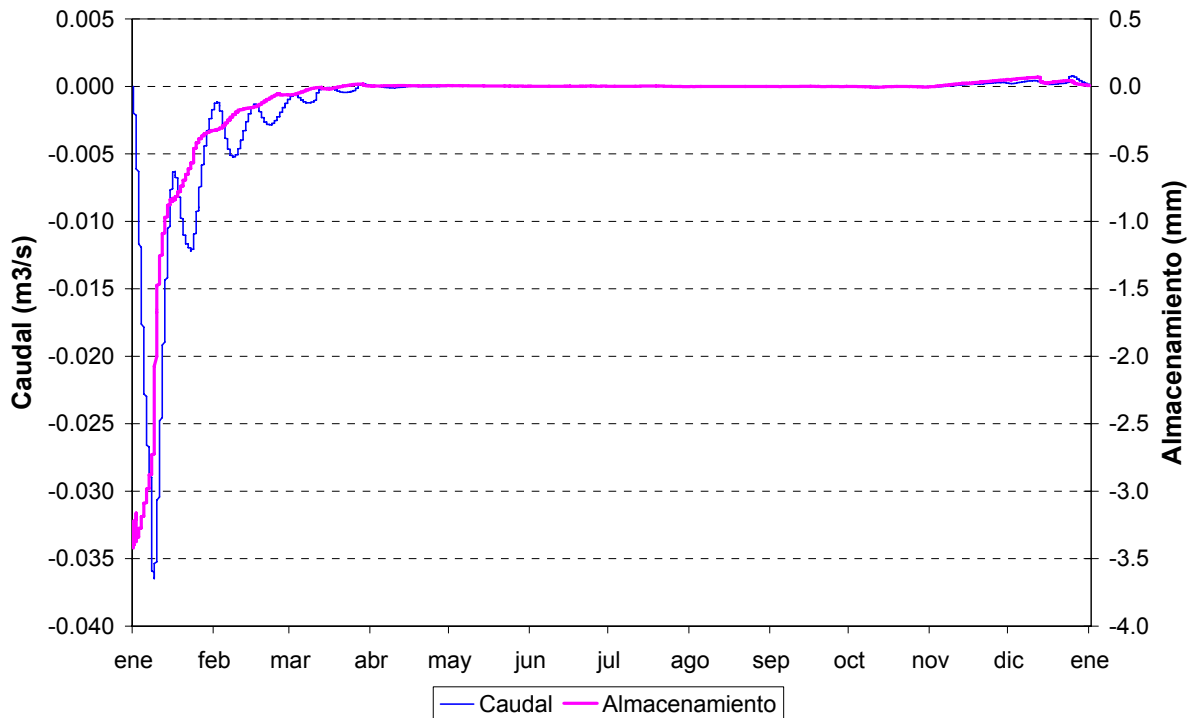


Figura 3.1.3: Diferencia entre resultados para el primero y el segundo ciclo del escenario de prueba para la subcuenca Estepa (#5) con histograma periódico.

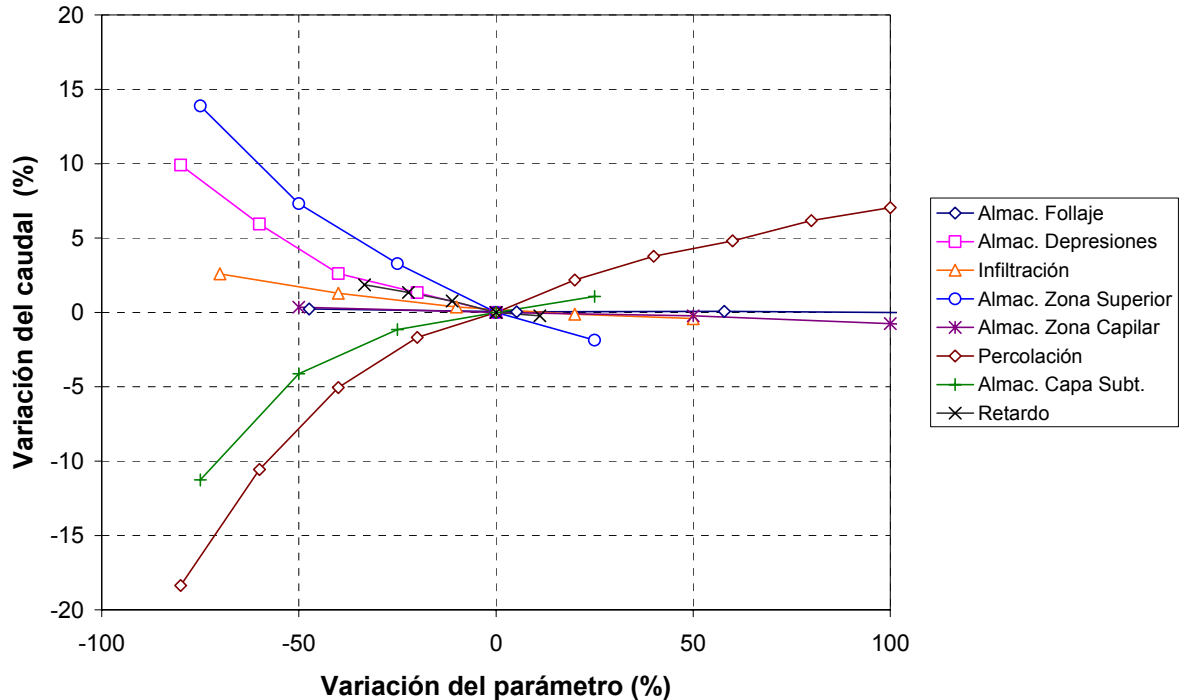
3.1.2 Análisis de sensibilidad

Se efectuaron ensayos de sensibilidad de la respuesta de las subcuencas a variaciones en los parámetros de entrada. Específicamente, para el escenario de prueba se analizó la variación del caudal medio anual y del caudal máximo anual de la subcuenca Estepa (#5) cuando se variaban en forma independiente cada parámetro del modelo de balance vertical, dentro de su rango práctico. En la Tabla 3.1.1 se indican los parámetros, el valor central y su rango de variación.

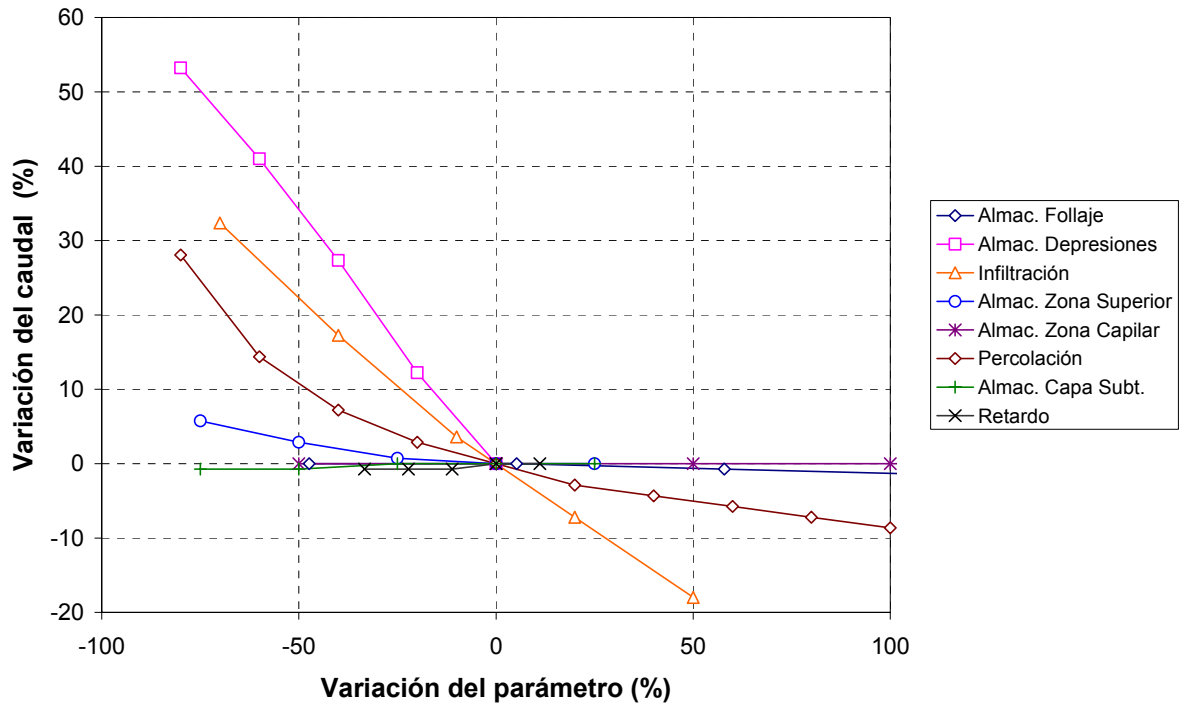
Los resultados se muestran en la Figura 3.1.4. Se observa que el caudal medio (Figura 3.1.4a) es más sensible en primer lugar a la percolación máxima; luego al almacenamiento máximo en el follaje; le siguen los almacenamientos máximos en depresiones y en la capa subterránea; la sensibilidad es muy baja a los almacenamientos máximos en la Zona Superior y Capilar. Por su parte, en el caso del caudal máximo (Figura 3.1.4b) la sensibilidad es mayor al almacenamiento máximo en depresiones, seguido por la infiltración, luego la percolación y en cuarto lugar el almacenamiento máximo en la Zona Superior; la sensibilidad es poco significativa para el resto de los parámetros.

Tabla 3.1.1: Rangos de variación de los parámetros del modelo.

Parámetro	Unidades	Valor central	Rango
Almacenamiento máximo en follaje	mm	1,9	0 – 5
Almacenamiento máximo en depresiones	mm	50	0 – 50
Infiltración máxima	mm/hr	1	0 – 1,5
Almacenamiento máximo en Zona Superior	mm	400	20 – 500
Almacenamiento máximo en Zona Capilar	mm	20	0 – 50
Percolación máxima	mm/hr	0,5	0 – 1
Almacenamiento máximo en Capa Subterránea	mm	800	0 – 1000
Tiempo de retardo	hr	90	50 – 100



a) Caudal medio



b) Caudal máximo

Figura 3.1.4: Sensibilidad del caudal a variaciones en los parámetros de calibración.

Por otro lado, se analizó la sensibilidad del hidrograma del Estepa a la modelación de la evapotranspiración potencial. En la Figura 3.1.5 se presenta la comparación entre los hidrogramas resultantes de utilizar el modelo establecido en este estudio (Priestley-Taylor) con los más simples de Penman-Montheit y Thornwaite. Sólo se observan diferencias mínimas en el flujo de base. Esto autoriza a utilizar las formulaciones simplificadas para años en los cuales se carece de los datos necesarios para aplicar la de Priestley-Taylor.

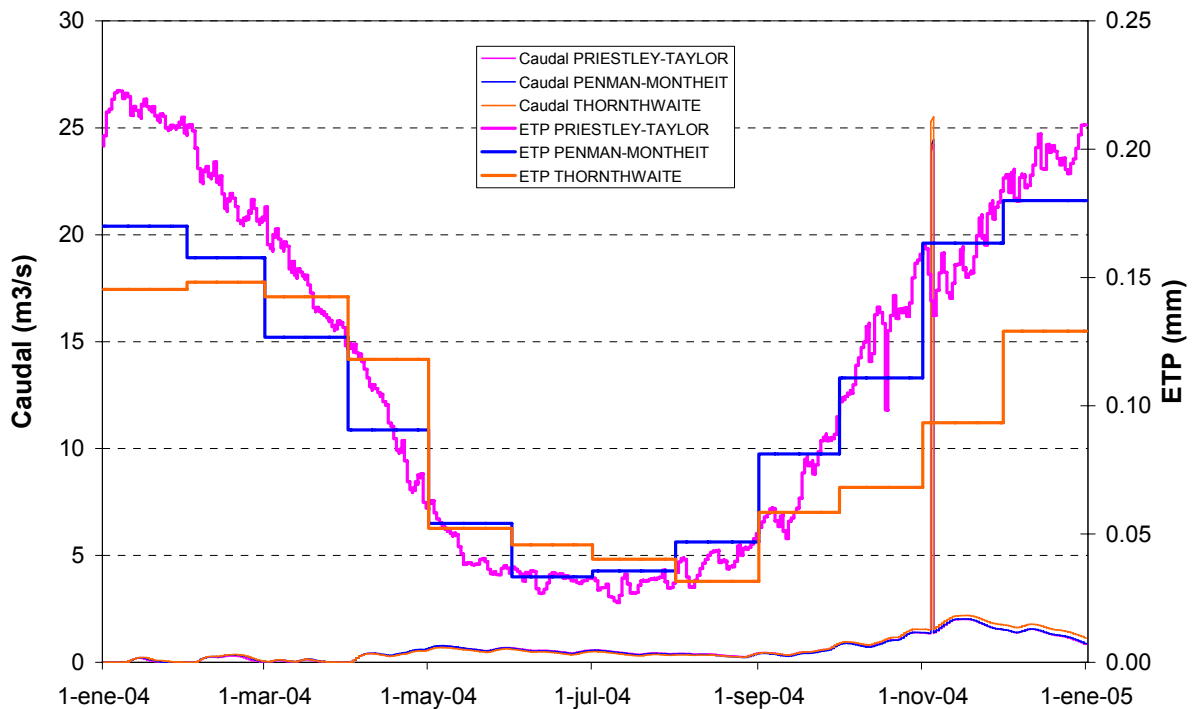


Figura 3.1.5: Sensibilidad del hidrograma del Estepa a variaciones en el modelo de evapotranspiración potencial (ETP).

3.2 RESPUESTA DEL ARROYO

3.2.1 Caudales

La Figura 3.2.1 muestra el hidrograma de caudales en la desembocadura del A° Zaimán para el escenario de prueba. Allí también se representa la serie temporal de precipitaciones diarias, como referencia. Se observa que, luego del transitorio de alrededor de 4 meses, se establece un caudal de base que varía aproximadamente entre 1,5 y 3 m³/s, el cual se incrementa hasta alrededor de 7 m³/s durante el período de precipitaciones máximas (octubre-noviembre). Sobre este flujo de base se superponen ondas de inundación de pocos días de duración; el pico máximo alcanza aproximadamente 120 m³/s, pero los siguientes máximos son del orden de entre 15 y 20 m³/s.

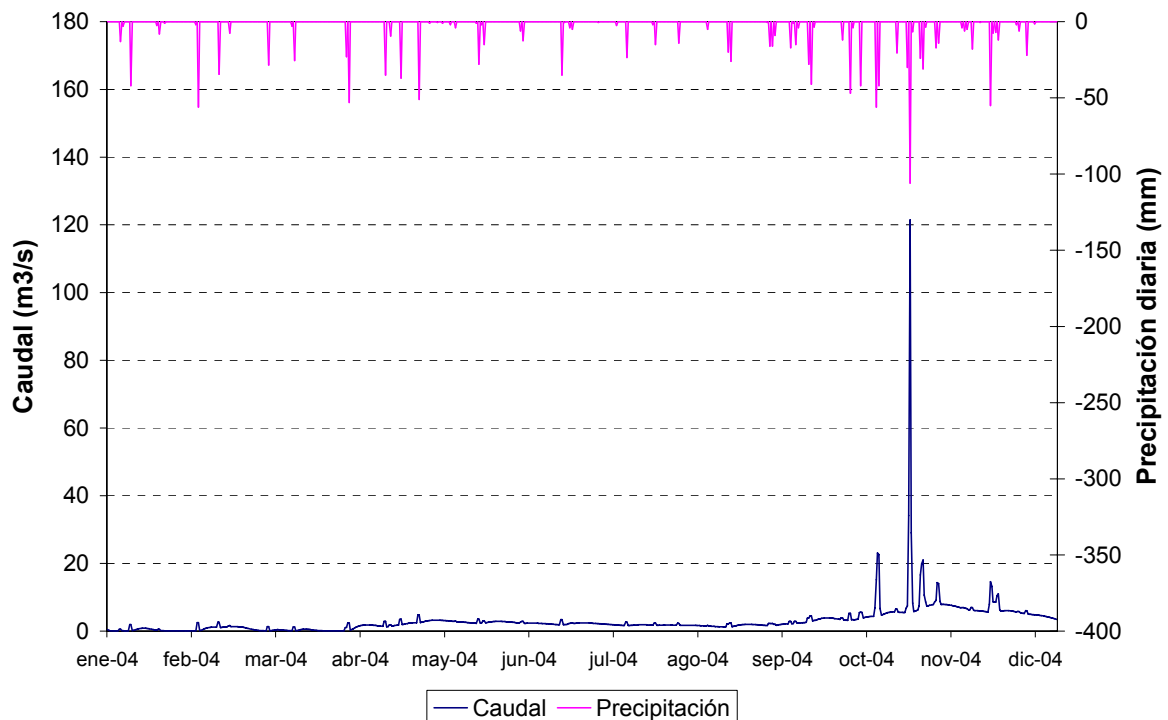


Figura 3.2.1: Caudal en la desembocadura del A° Zaimán para el escenario de prueba.

3.2.2 Niveles

Para analizar la respuesta en niveles del A° Zaimán para el escenario de prueba, se seleccionaron 5 estaciones a lo largo de su curso, las que coinciden con las secciones identificadas en la Figura 3.2.2. Pero además se efectuó un segundo ensayo modificando la condición de borde de nivel del escenario de prueba, llevándola a cota 83 m. De esta manera, de la comparación de ambas corridas surge una primera impresión del alcance de los efectos de remanso esperables a futuro.

La Figura 3.2.3 muestra los hidrogramas correspondientes. En la Sección 2 (ubicada a 1,5 km de la desembocadura) se observa claramente el control que ejerce el efecto de remanso sobre el nivel para ambos casos; sólo a cota 78 m aparece un control del arroyo para la máxima crecida. A cota 78 m, en la Sección 9 (3 km) ya son comparables los efectos de remanso y del arroyo, mientras que a cota 83 m sigue mandando el remanso. En la Sección 15 (5 km) los niveles a cota 78 m ya están controlados por el arroyo; a cota 83 m, éste logra controlar sólo durante la máxima crecida. En las dos estaciones restantes, secciones 30 (11,3 km) y 33 (12,9 km) el control lo ejerce totalmente el arroyo; de hecho, se observa que coinciden los resultados para ambas cotas del embalse.

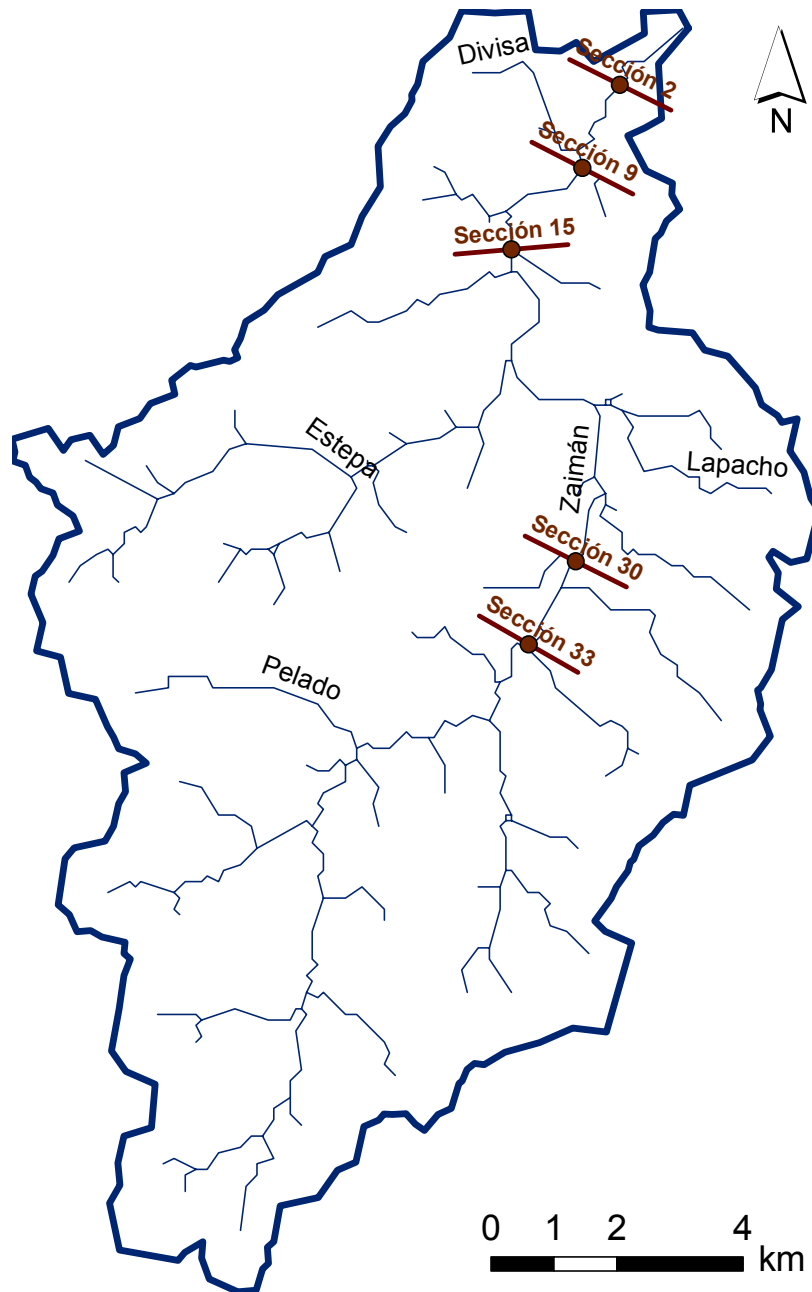
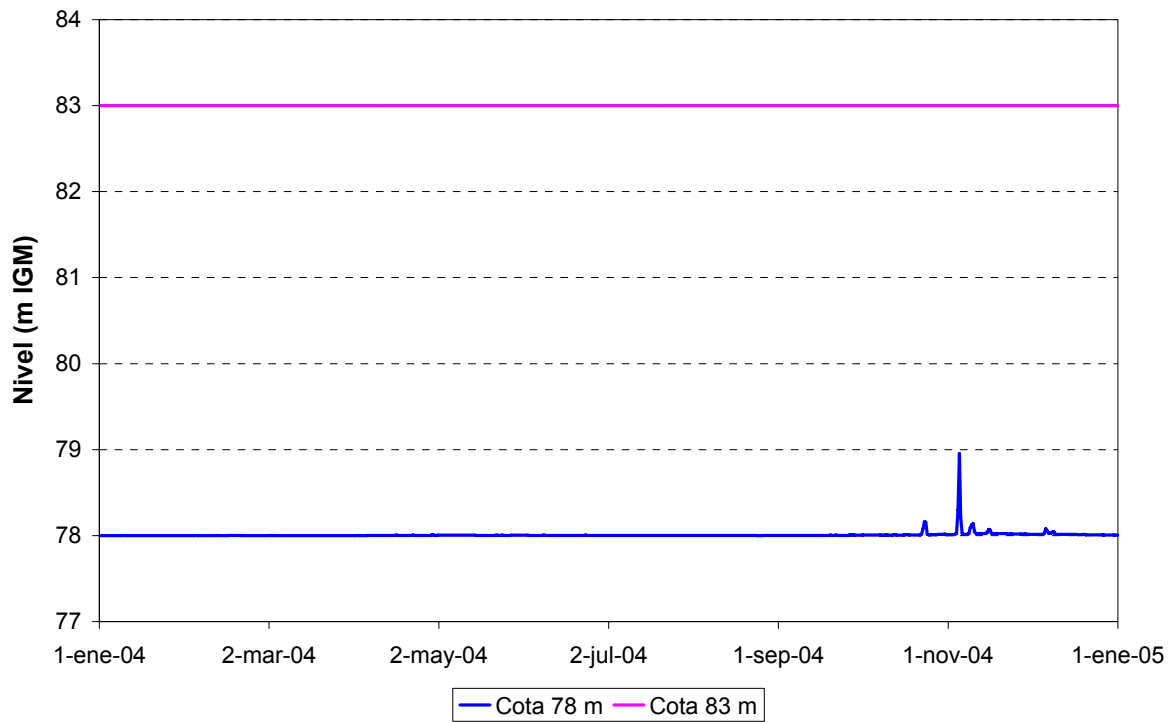
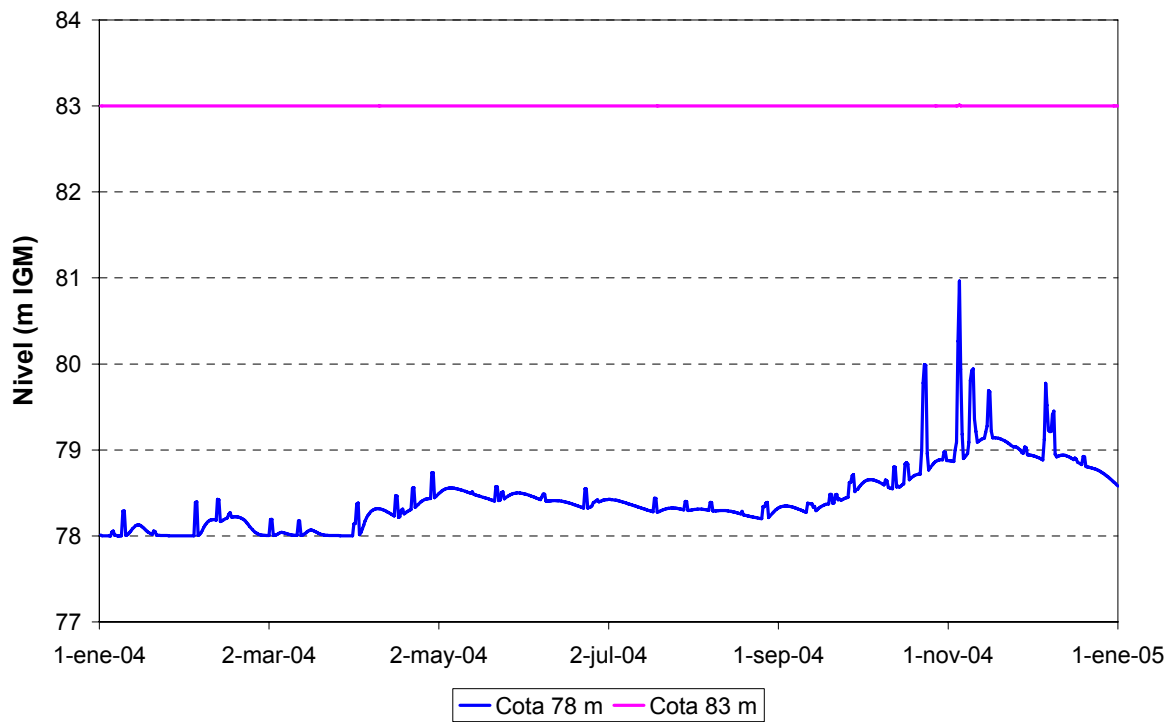


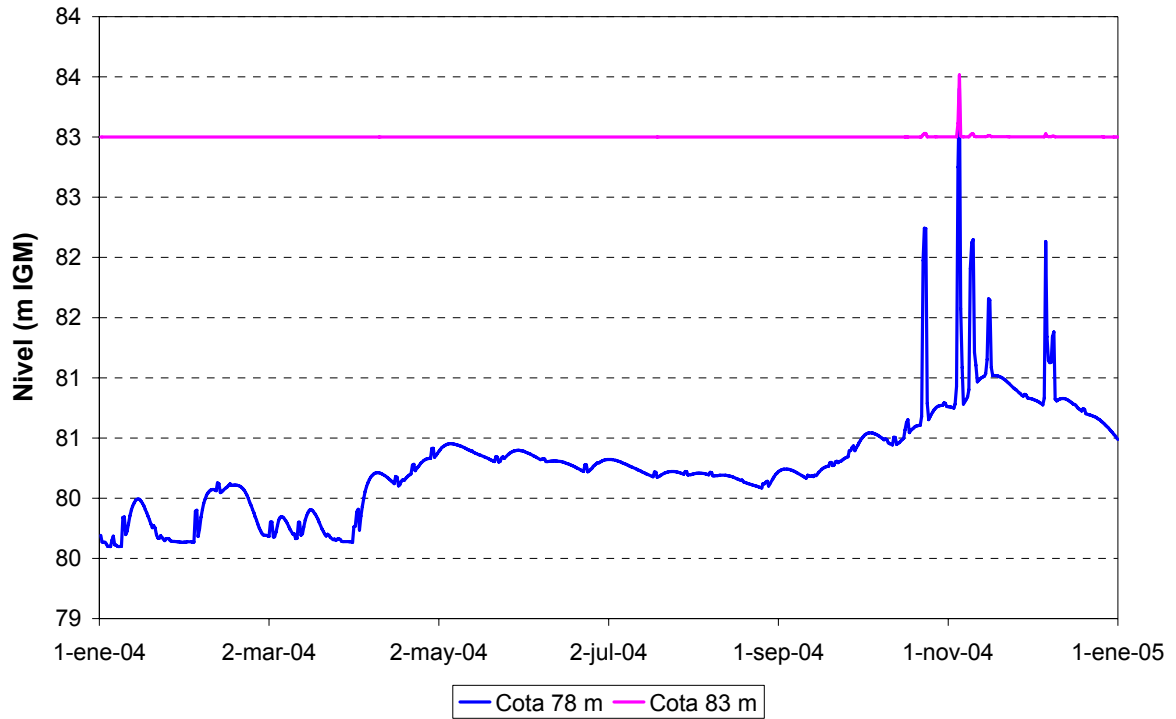
Figura 3.2.1: Estaciones de control del nivel del A° Zaimán para el escenario de prueba.



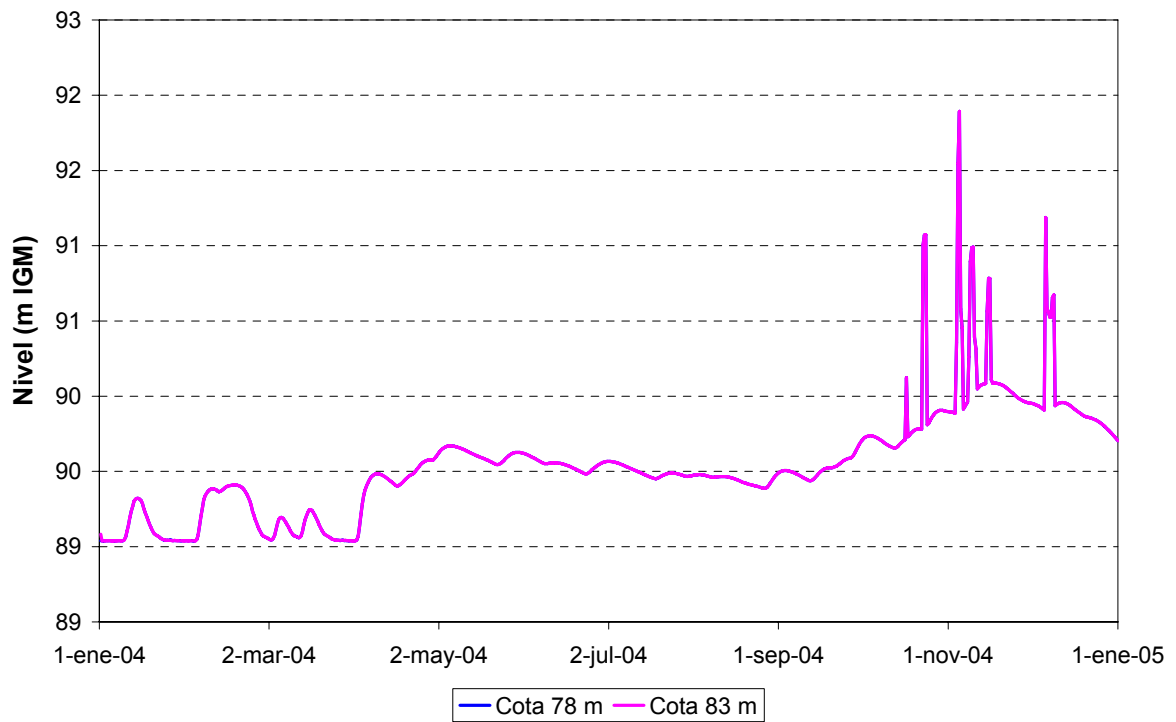
a) Sección 2 (1,5 km)



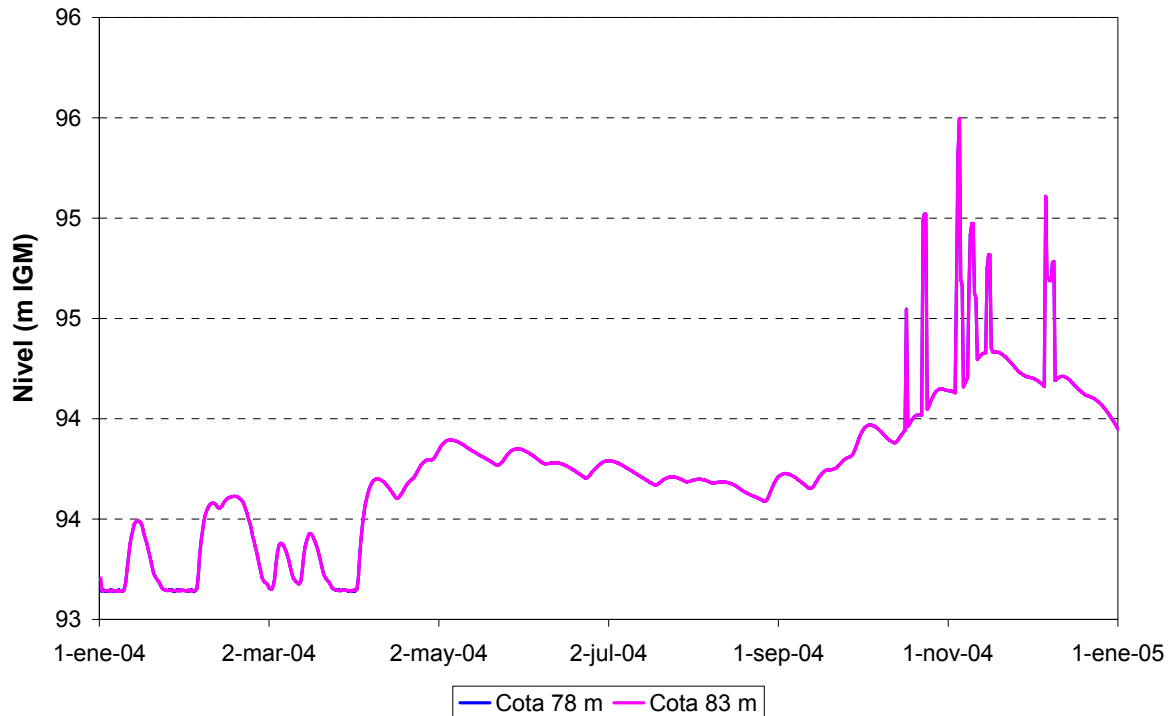
b) Sección 9 (3,0 km)



c) Sección 15 (5,0 km)



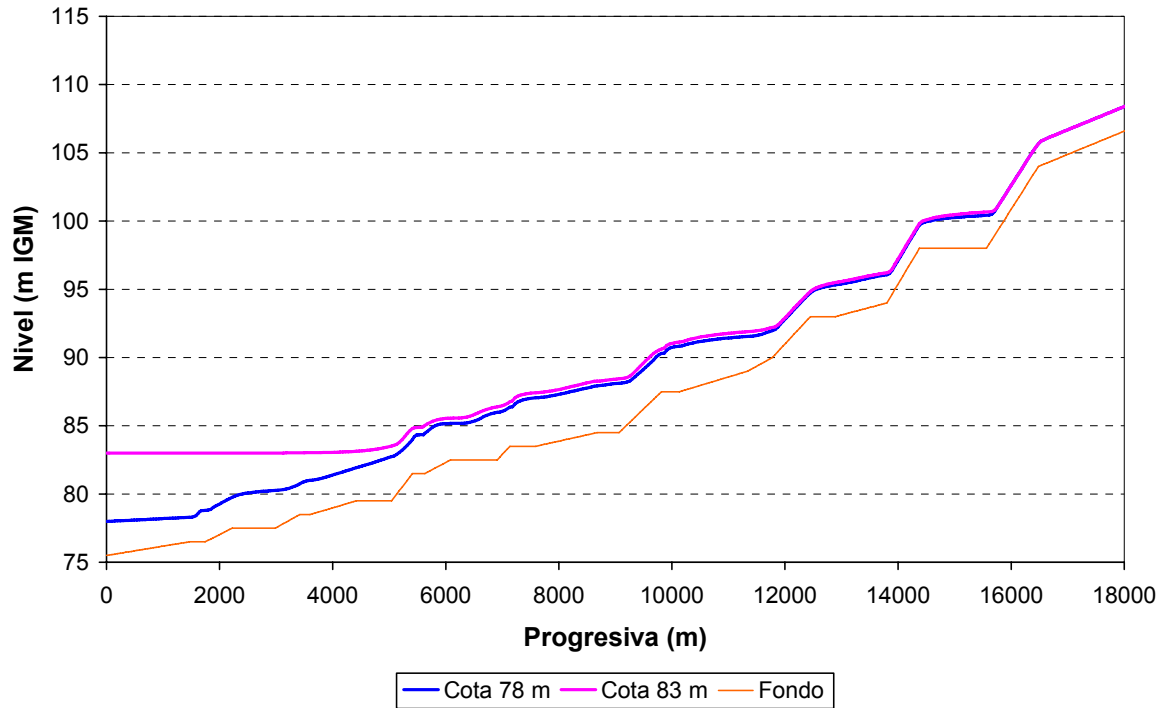
d) Sección 30 (11,3 km)



e) Sección 33 (12,9 km)

Figura 3.2.2: Hidrogramas en estaciones de control del nivel del A° Zaimán para el escenario de prueba con dos cotas del embalse.

Como complemento a este análisis, en la Figura 3.2.3 se muestra el perfil longitudinal del nivel para las dos cotas, correspondiente al instante de máxima crecida (4 de noviembre), y su diferencia. Se observa que los mayores efectos de remanso por elevar el nivel desde cota 78 a cota 83 m se producen en los primeros 5 km. De allí en más la sobrelevación es menor a 0,5 m. Los mapas de inundación correspondientes se presentan en la Figura 3.2.4; allí se aprecian las zonas inundadas para cada cota de embalse, y la zona donde se produce inundación por el aumento de cota de 78 a 83 m.

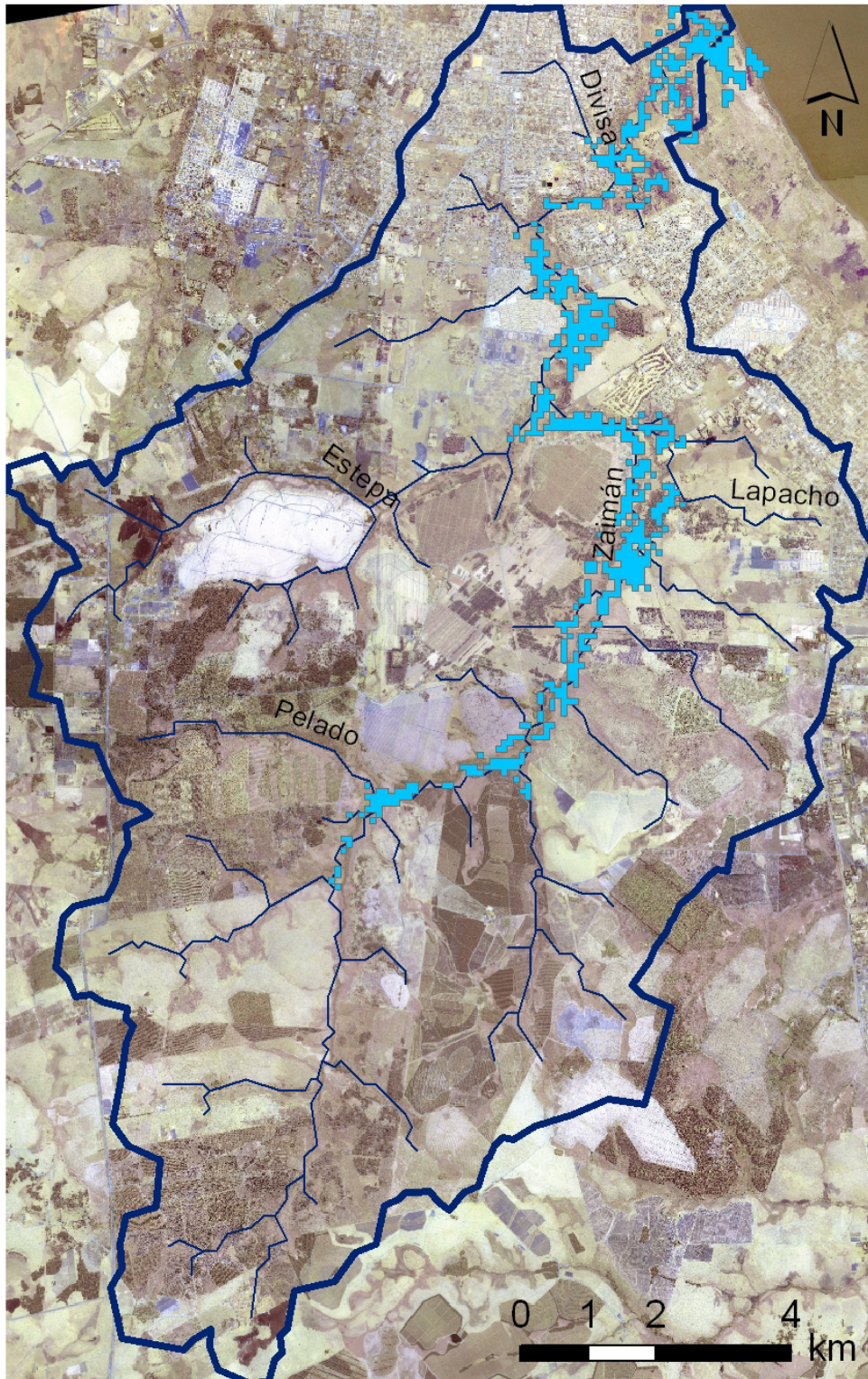


a) Perfil longitudinal del nivel

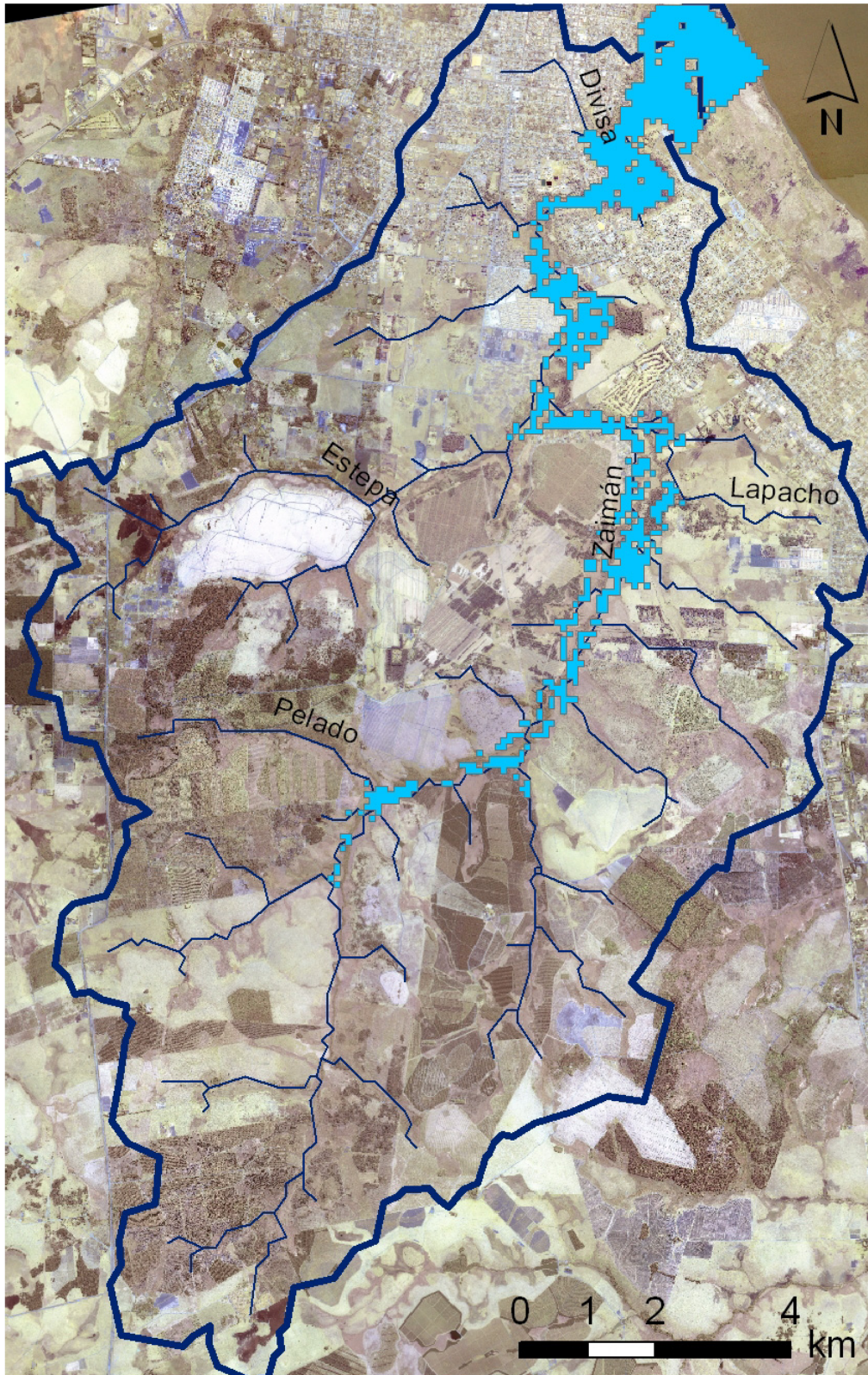


b) Diferencia de niveles

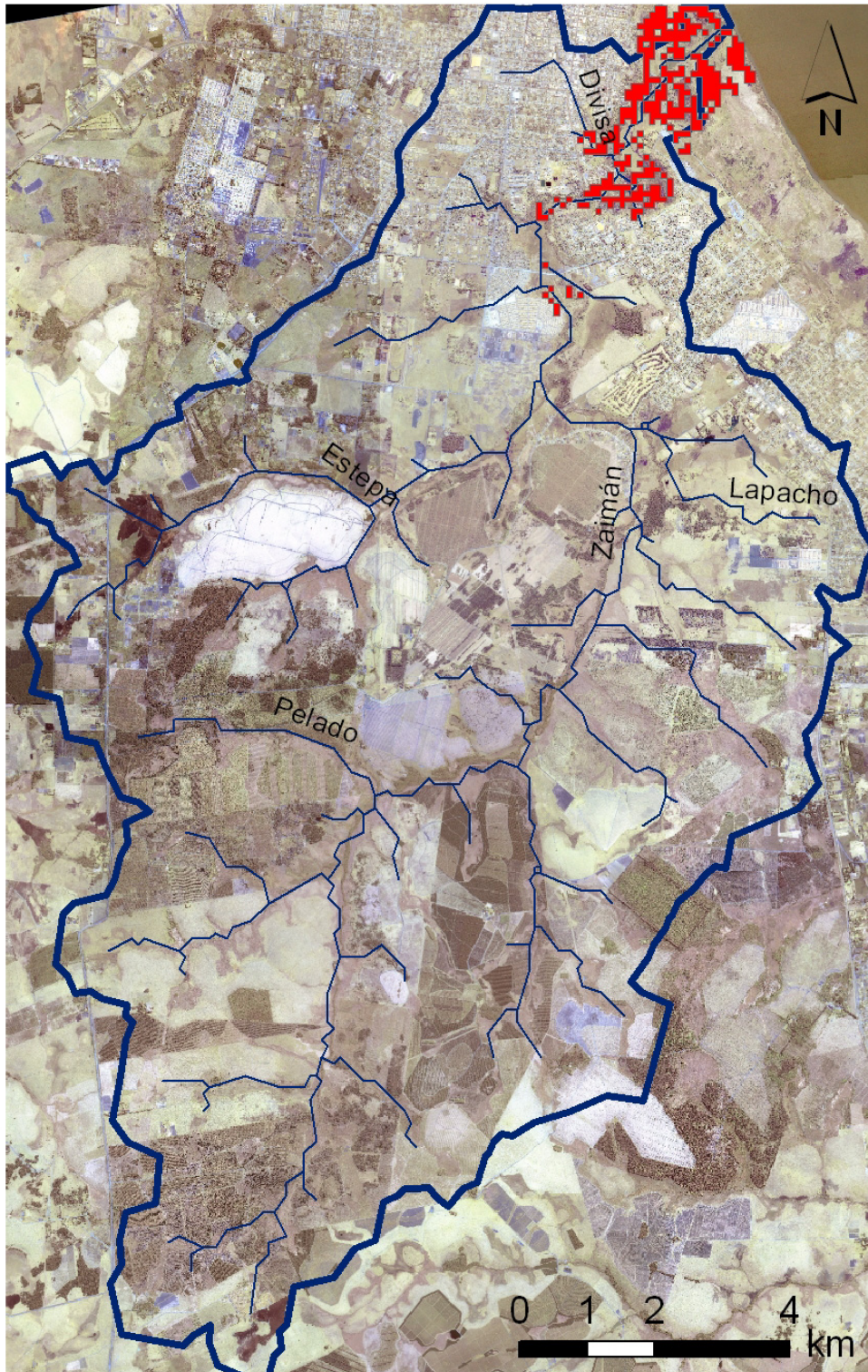
Figura 3.2.3: Distribuciones longitudinales de nivel para el instante de máxima crecida del A° Zaimán, con dos cotas del embalse (Eescenario de prueba).



a) Cota 78 m



b) Cota 83 m



c) Incremento al pasar de cota 78 a 83 m

Figura 3.2.4: Mapas de inundación para el instante de máxima crecida del A° Zaimán, con dos cotas del embalse (Escenario de prueba).

3.3 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

Para la calibración del modelo se dispuso de registros hidrométricos con paso de 3 horas en tres escalas sobre el A° Zaimán, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 3.3.1, a saber:

- Puente sobre Ruta Nacional 12 (RN 12)
- Laguna de tratamiento del complejo habitacional A32
- Puente ferroviario (FFCC)

Los registros se extienden sobre la ventana de tiempo que va de enero de 1995 a abril de 1997, presentando algunos baches.

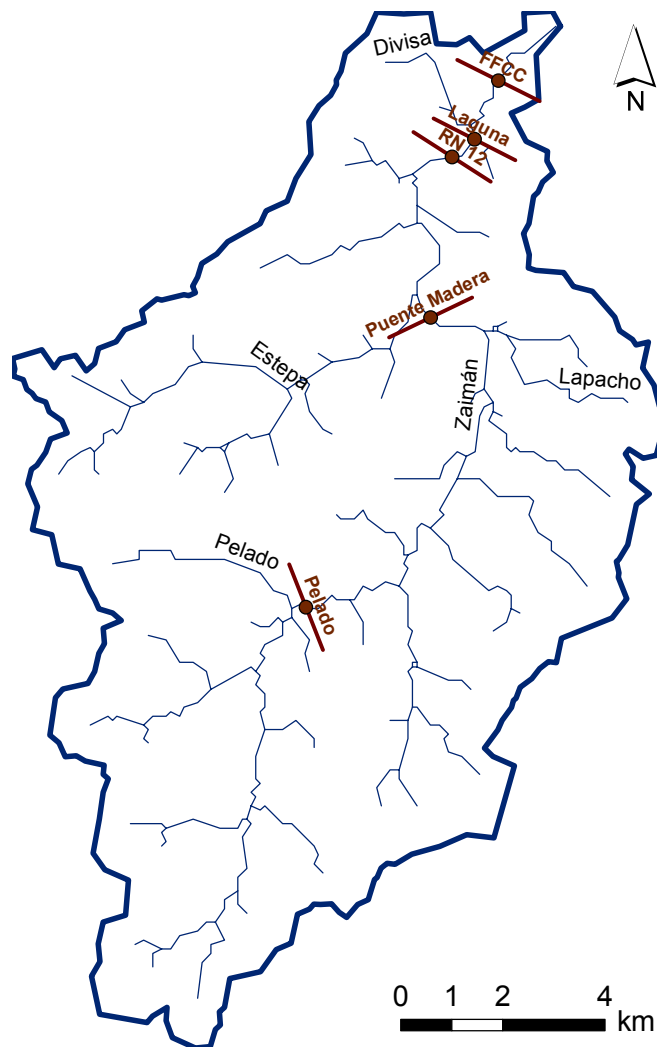


Figura 3.3.1: Ubicación de escalas de calibración.

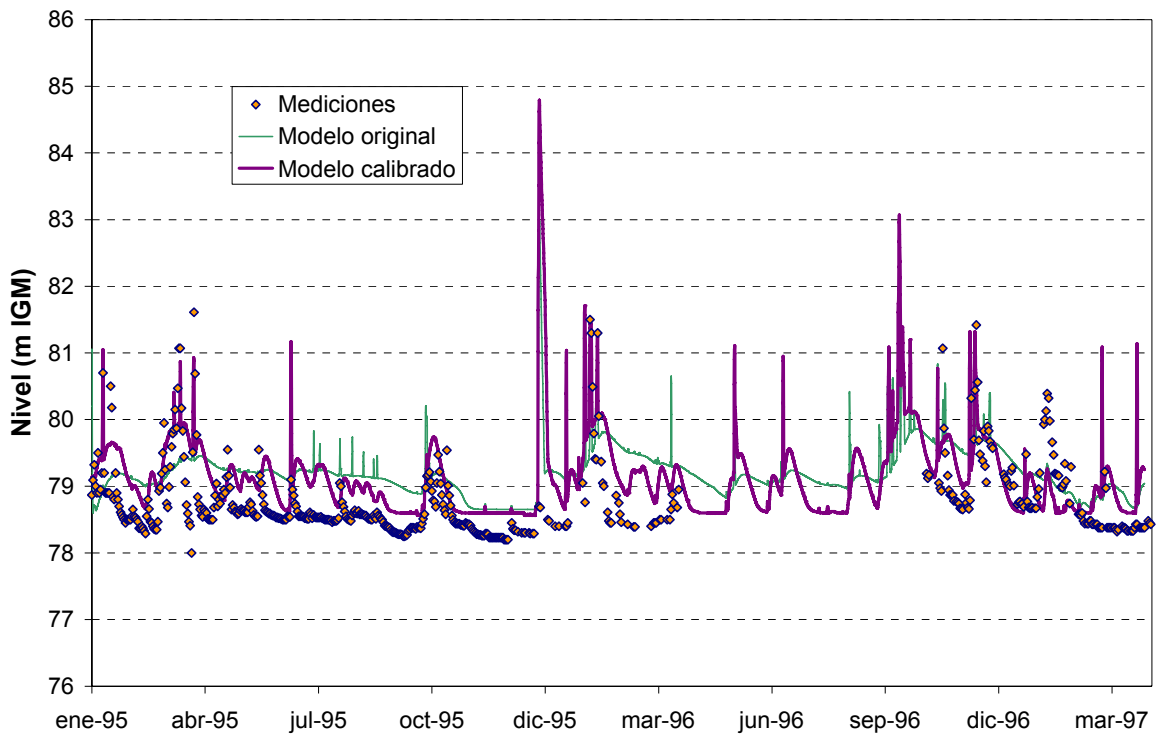
Las comparaciones mostraron que el modelo, con los valores de los parámetros establecidos a priori, sobrestima el flujo de base y subestima la escorrentía; en particular, subestima los picos de nivel. Se efectuaron ajustes, entonces, en tres de los cuatro parámetros para los cuales el caudal máximo resulta más sensible, de acuerdo a la Figura 3.1.4b, a saber:

- El almacenamiento máximo en depresiones fue reducido de 50 a 20 mm (lo que significaría una zona de muy bajas pendientes, pero no plana, de acuerdo a la Tabla 2.4.2).
- La infiltración fue reducida de 2,5 a 1,3 mm/h (que es el límite inferior para suelos tipo C, de acuerdo a la Tabla 2.4.6).
- La profundidad de raíces del pastizal fue corregida de 1 m a 10 cm, con lo que surgieron los almacenamientos máximos en la Zona Superior y en el Capa Subterránea mostrados en la Tabla 3.3.1 (que reemplaza a la Tabla 2.4.3).

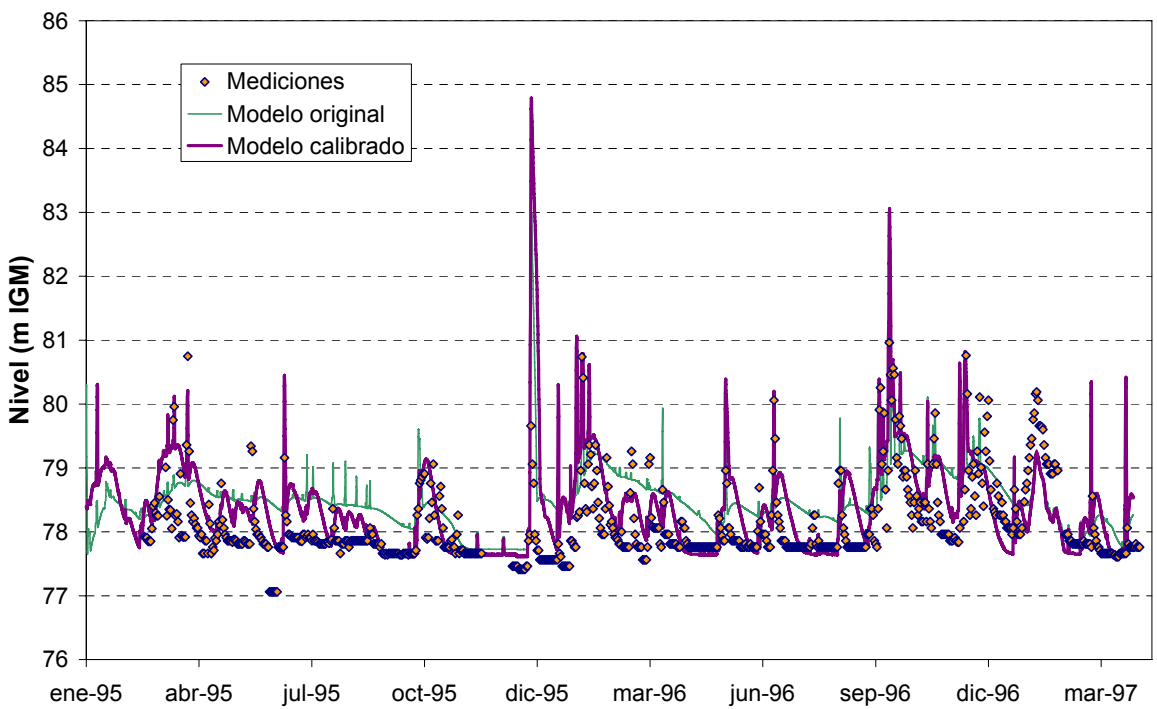
Tabla 2.4.3: Capacidades del suelo de las subcuencas

ID	Nombre	Almac. Máx. Zona Sup. (m)	Almac. Máx. Capa Subt. (m)	Espesor Suelo (m)
1	Desembocadura	0,04	1,10	2,9
2	Divisa	0,04	1,04	2,7
3	Villa Dolores	0,06	0,87	2,3
4	Lapacho	0,04	0,74	2,0
5	Estepa	0,21	0,54	1,9
6	Intermedia	0,34	0,41	1,9
7	San Antonio	0,05	0,61	1,7
8	Santa Carla	0,15	0,42	1,4
9	San Ignacio	0,07	0,50	1,4
10	San José	0,07	0,44	1,3
11	Pelado	0,12	0,33	1,1
12	Santa Inés	0,19	0,17	0,9
13	Superior	0,08	0,13	0,5

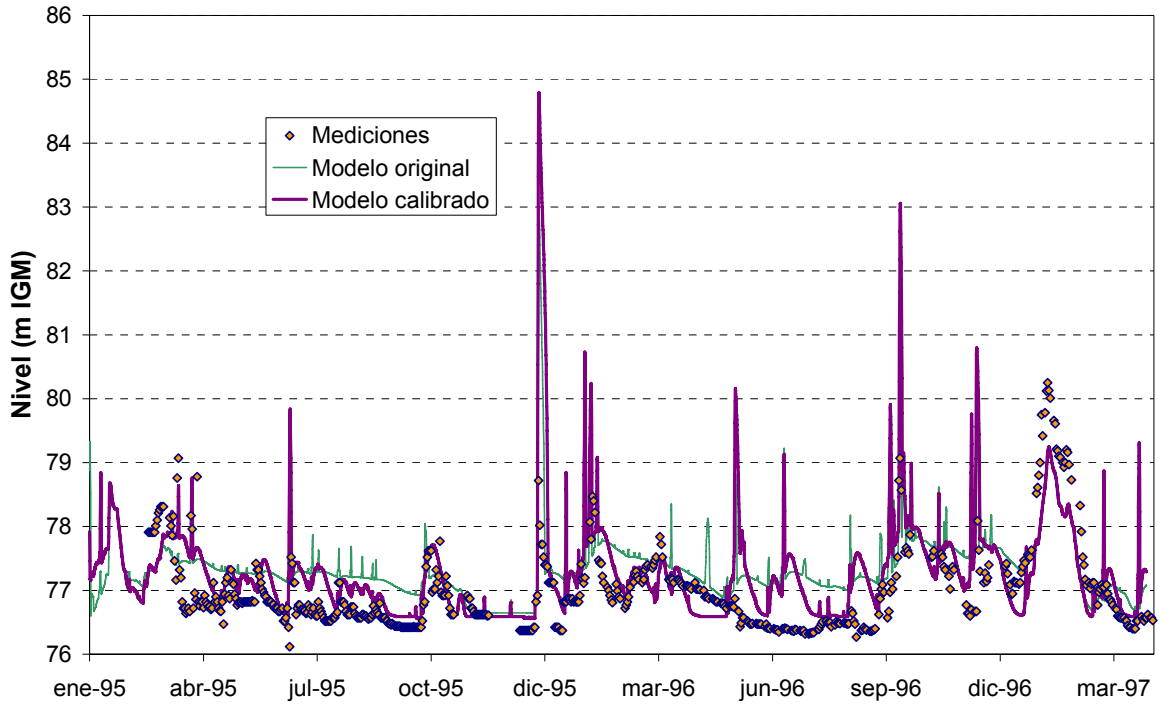
En la Figura 3.3.2 se muestra la comparación entre los resultados del modelo original (con los valores de los parámetros establecidos a priori) y del modelo calibrado con las mediciones. El acuerdo entre el modelo calibrado y las mediciones se considera satisfactorio para las tres estaciones, en términos generales. Se observa la mejora en la respuesta introducida por la calibración, al comparar la performance del modelo original con el calibrado. En la Figura 3.3.3 se repite la comparación, pero manteniendo sólo los resultados del modelo calibrado, para mayor claridad. Las desviaciones observadas para representar algunos eventos son atribuibles a la limitación de representar a la totalidad de la cuenca tanto con datos provenientes de una sola estación de precipitaciones, como con parámetros de calibración uniformes en el espacio. De todos modos, el modelo se muestra confiable para reproducir los mayores picos medidos con una incertidumbre menor al metro. Menor incertidumbre tendrá la diferencia entre resultados de picos de inundación correspondientes a distintas cotas de embalse, que es uno de los resultados más importantes buscados en este estudio.



a) Ruta Nacional 12

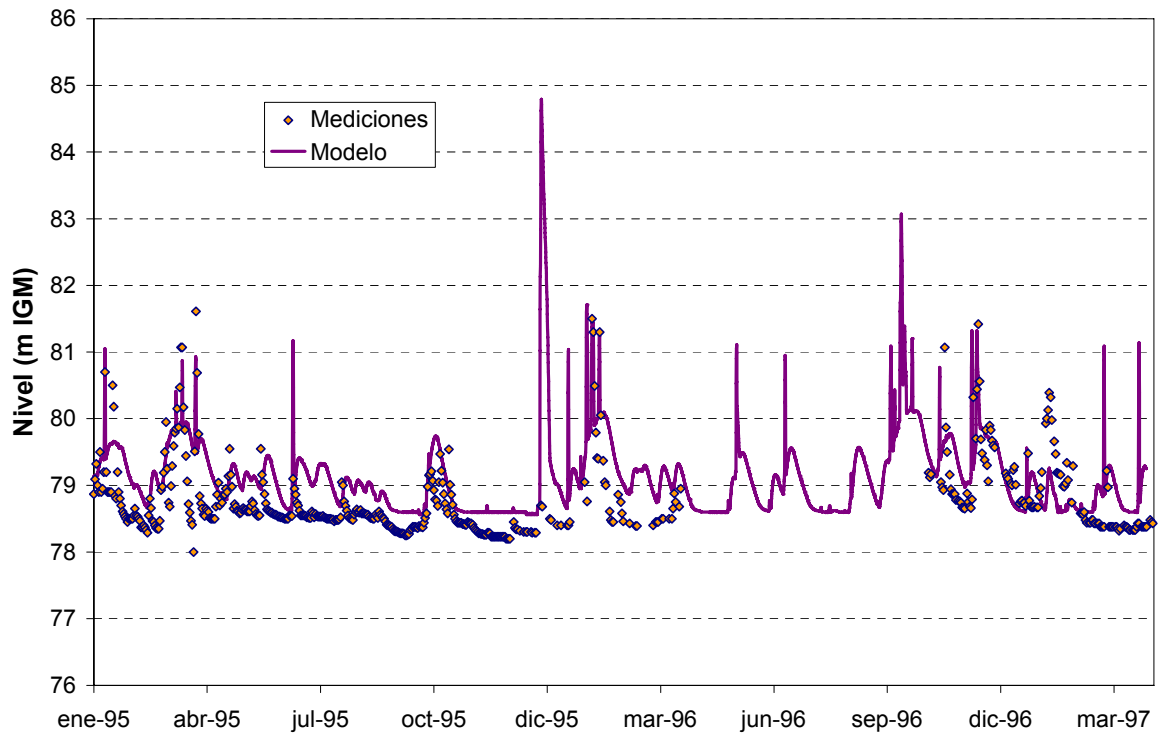


b) Laguna de Tratamiento

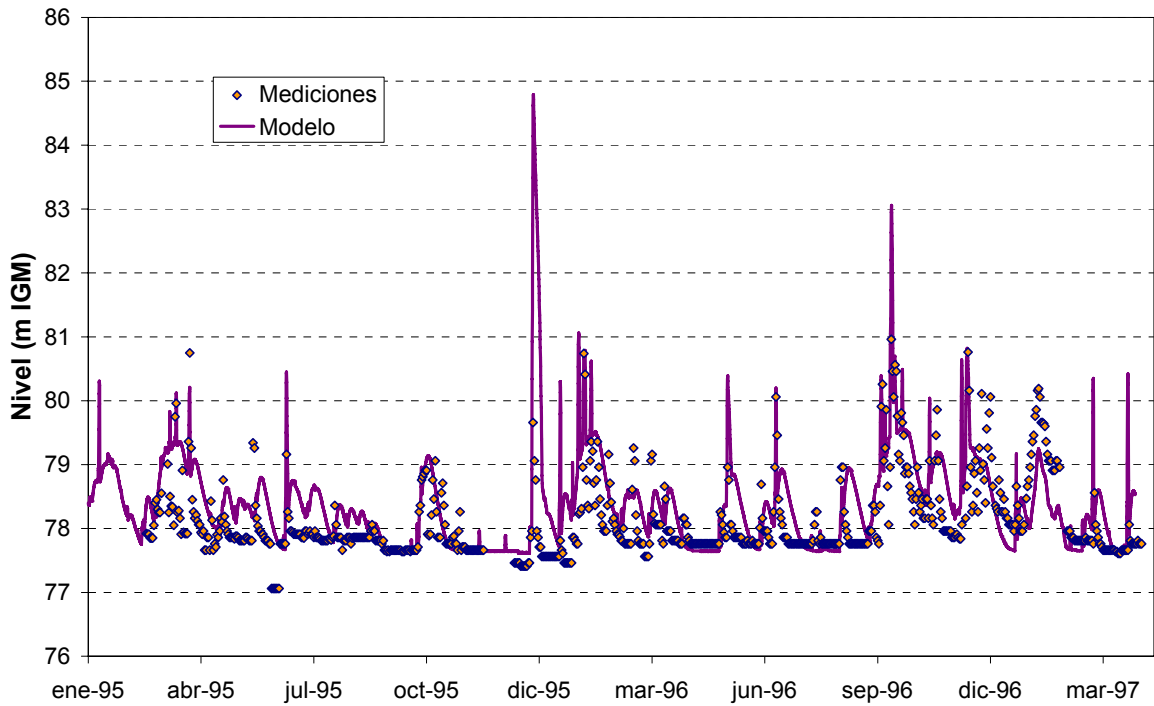


c) Puente Ferroviario

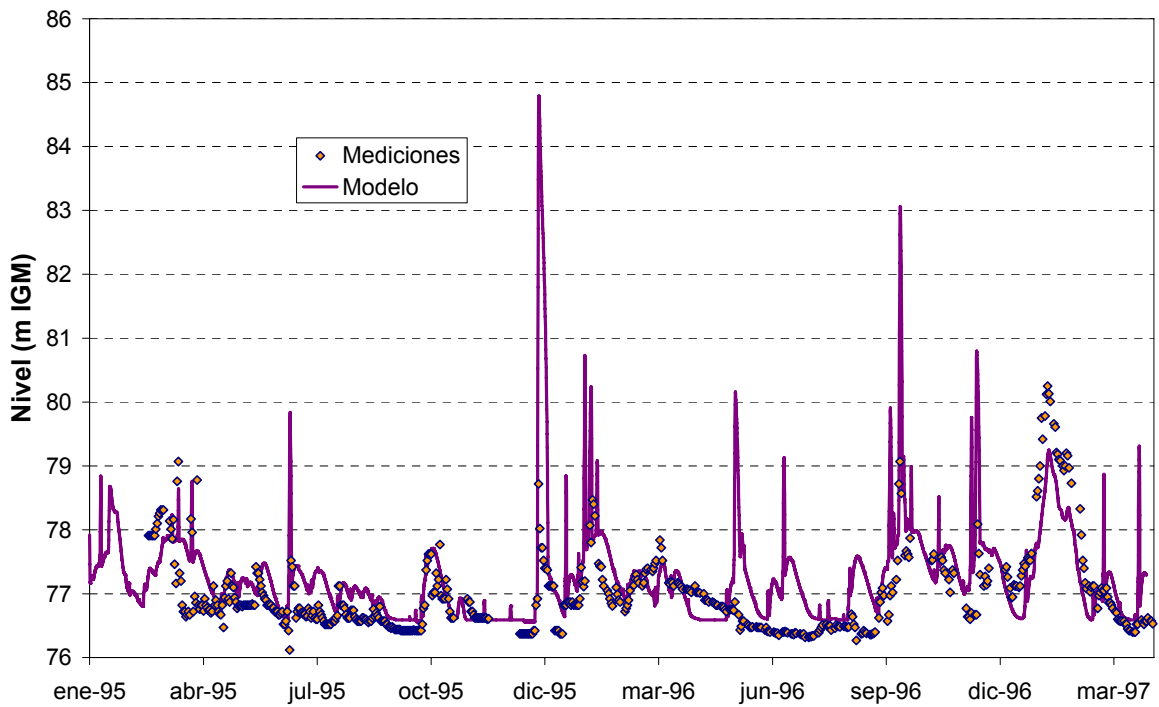
Figura 3.3.2: Comparación entre resultados del modelo y mediciones.



a) Ruta Nacional 12



b) Laguna de Tratamiento



c) Puente Ferroviario

Figura 3.3.3: Comparación entre resultados del modelo calibrado y mediciones.

Como verificación del modelo se dispuso de estimaciones del nivel máximo alcanzado en dos secciones del A° Zaimán, obtenido de fotografía, en oportunidad de la ocurrencia de algunas crecidas. Específicamente se contó con la siguiente información (ver Figura 3.3.1):

- *Puente de Madera “El Porvenir”*: En la Figura 3.3.4 se muestran fotografías en los momentos de nivel de agua máximo en dos crecidas ocurridas el 22/Jul/02 y el 30/Set/02. De la primera se estima que el nivel cae a 0,50 m por debajo del tablero del puento, mientras que de la segunda la estimación es que el agua alcanza el nivel del tablero. La cota del tablero se estimó, a partir del MDT, en 86,5 m IGM (con un error de $\pm 0,5$ m).
- *Sección ‘Pelado’*: La Figura 3.3.5 presenta una fotografía del momento de nivel de agua máximo para la crecida ocurrida el 27/Nov/03. A partir del MDT se estimó la cota del terreno anegado en 105,5 m IGM ($\pm 0,5$ m).



a) 22/Jul/02



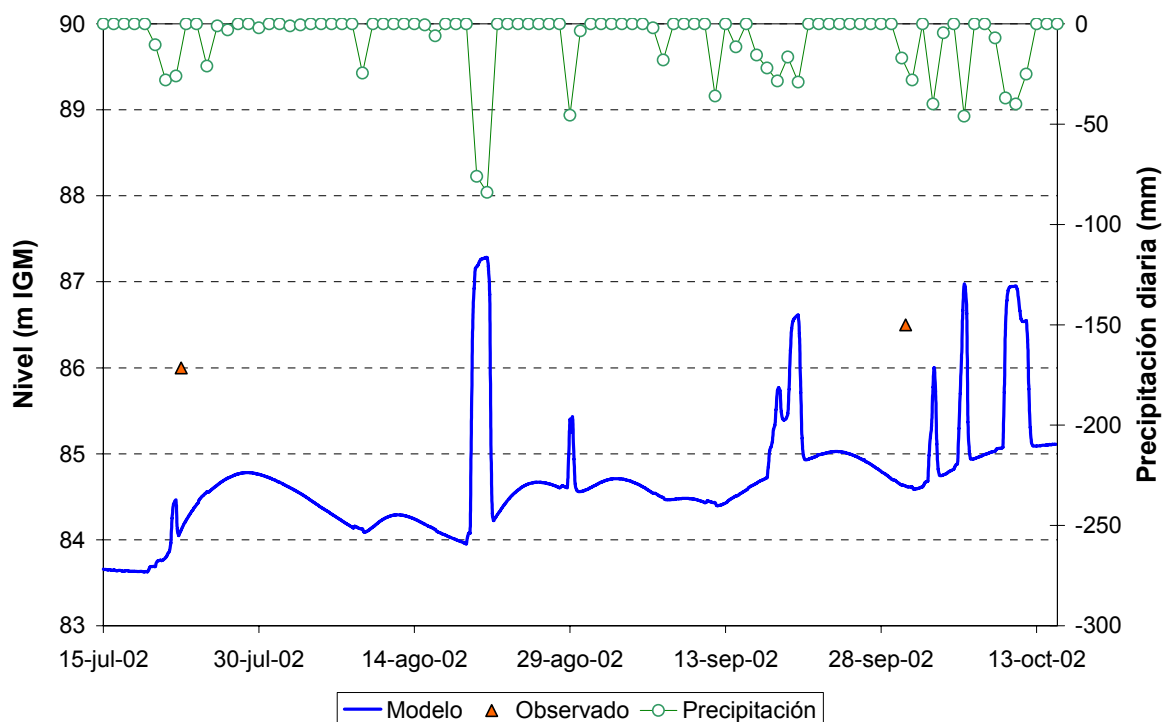
b) 30/Set/02

Figura 3.3.4: Nivel de agua máximo alcanzado en el Puente de Madera “El Porvernir”.

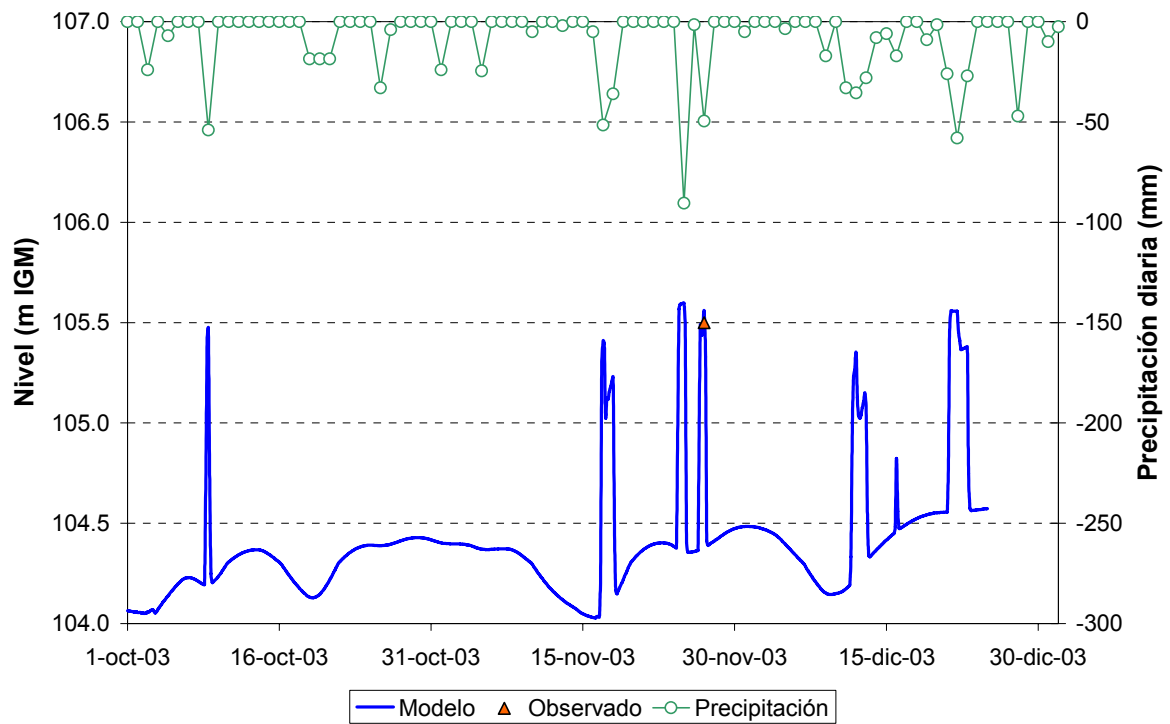


Figura 3.3.5: Nivel de agua máximo alcanzado en la sección Pelado.

En la Figura 3.3.6 se presentan los resultados para ambas secciones de verificación. Se observa que el modelo no llega a representar los picos (es decir, las variaciones bruscas asociadas a la escorrentía, en lugar de las más suaves relacionadas al flujo de base) ocurridos en ambos eventos de 2002 en el Puente de Madera El Porvenir (Figura 3.3.6a); en el caso del evento de julio el pico es subestimado (aún teniendo en cuenta la incertidumbre en el valor observado), mientras que para el evento de setiembre directamente no se produce pico alguno. En cambio, el acuerdo en la Sección Pelado es excelente (Figura 3.3.6b). Una observación más cuidadosa de la respuesta del modelo (incluido el período de calibración) indica que éste no produce picos (es decir, escorrentía), ó éstos son mínimos, cuando ocurren precipitaciones diarias menores a 50 mm, sobre una condición antecedente de ausencia de lluvias. Este es precisamente el caso de los dos eventos de 2002 (Figura 3.3.6a). La representación del modelo es satisfactoria en el caso contrario, como el evento de 2003 (Figura 3.3.6b). Como el interés principal del presente estudio apunta a simular los picos de inundación mayores, el modelo se considera adecuado.



a) Puente de Madera "El Porvenir"



a) Sección Pelado

Figura 3.3.6: Series de niveles en secciones de verificación.

4 CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que surgen de esta etapa de implementación y calibración del modelo hidrológico-hidráulico del A° Zaimán, en cuanto tanto al comportamiento del sistema como a la performance del modelo, son las siguientes:

- En la cuenca baja prácticamente todos los pulsos diarios de precipitación dan lugar a pulsos de escorrentía superficial que alcanzan el A° Zaimán. En cambio, en las cuencas media y alta sólo los pulsos de precipitación más intensos se manifiestan como escorrentía superficial, mientras que el resto se incorpora atenuado y retrasado al escurrimiento del A° Zaimán como flujo de base.
- La “memoria” hidrológica de las subcuencas es del orden de los cuatro meses, es decir, esa es la escala de tiempo sobre la cual se sienten los efectos de la acción de los forzantes hidrológicos.
- El flujo de base del A° Zaimán en la desembocadura es de unos pocos m^3/s , que se puede triplicar durante el período de precipitaciones máximas (octubre-noviembre). Sobre este flujo de base se superponen ondas de inundación originadas en la escorrentía superficial, cuyo caudal pico puede superar los $100 m^3/s$ para los eventos de mayor envergadura.
- A cota de embalse 78 m, los efectos de remanso dominan la dinámica del A° Zaimán hasta aproximadamente 1,5 km aguas arriba de la desembocadura. A alrededor de 3 km son comparables los efectos de remanso y del régimen hidrológico del arroyo. La hidrología del arroyo controla totalmente su régimen desde los 5 km, aproximadamente.
- A cota de embalse 83 m, los efectos de remanso dominan hasta los 5 km aguas arriba de la desembocadura. La hidrología del arroyo controla totalmente su régimen desde los 10 km, aproximadamente.
- Los mayores efectos de remanso por elevar el nivel del embalse desde cota 78 a cota 83 m se producen en los primeros 5 km. De allí en más la sobrelevación es menor a 0,5 m.
- El modelo no logra reproducir los picos de inundación del A° Zaimán cuando ocurren precipitaciones diarias menores a 50 mm, sobre una condición antecedente de ausencia de lluvias. Pero sí representa satisfactoriamente los picos en el caso contrario. Como el interés principal del presente estudio apunta a simular los picos de inundación mayores, el modelo se considera adecuado.

En la siguiente etapa de estudio, el modelo hidrológico-hidráulico del A° Zaimán será aplicado para simular su respuesta sobre el período completo de datos 1968-2003, de modo de poder efectuar consideraciones de tipo estadístico sobre las inundaciones. Estas simulaciones se efectuarán para cotas de embalse 76 m (etapa original), 78 m (etapa actual) y 83 m (etapa futura).