



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

**Modelo hidrodinámico del río Paraná para
pronóstico hidrológico: evaluación de performance,
actualización y extensión de su aplicación.**

ADECUACIÓN GEOMÉTRICA DEL MODELO



*Proyecto Interno 336
Informe LHA 01-336-12
Ezeiza, Julio de 2012*

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

**DIRECTORA DE LA DIRECCIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y ALERTA
HIDROLÓGICO**

Dr. Dora. GONIADZKI

DIRECTORES DEL PROYECTO

Ing. Mariano RE - Ing. Pablo E. GARCIA

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Ing. Pablo E. GARCIA

Ing. Juan BORUS

Ing. Juan GIACOSA

Lic. Leandro GIORDANO

Ing. Gastón LATESSA

Srta. Alicia PUCHETA

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Pablo E. GARCIA

Ing. Mariano RE

Ing. Gastón LATESSA

MODELO HIDRODINÁMICO DEL RÍO PARANÁ PARA PRONÓSTICO HIDROLÓGICO: EVALUACIÓN DE PERFORMANCE, ACTUALIZACIÓN Y EXTENSIÓN DE SU APLICACIÓN.

Adecuación geométrica del modelo

RESUMEN

Se construyó una base de datos georreferenciados con precisión de las secciones del modelo, las escalas hidrométricas y el eje del río Paraná. Se revisaron los ceros de las escalas hidrométricas del río Paraná dentro del dominio del modelo a partir de información provista por varias fuentes. La traza original del eje del río Paraná, fue recalculada a partir de la utilización herramientas con mayor precisión, obteniéndose una longitud total del tramo modelado del río Paraná de 54 km menos que la traza original. Se reubicaron, en cuanto a progresivas del modelo, a las secciones transversales y las escalas hidrométricas. Se hizo una revisión de cada una de las curvas de parámetros geométricos e hidráulicos de todas las secciones del río Paraná, encontrándose inconsistencias que fueron corregidas. Se verificaron los anchos de planicie de inundación de todas las secciones del modelo en el río Paraná a partir de la utilización de máscaras de agua, modificándose aquellos anchos que lo requirieron.

Descriptores temáticos: Modelación, Hidrodinámica, Pronóstico Hidrológico.

Descriptores geográficos: Río Paraná, Argentina, Paraguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	MODELO ANTECEDENTE	4
2.1	Sistema EZEIZA V	4
2.2	Parámetros numéricos	4
2.3	Coefficientes de rugosidad	5
2.4	Albardones	5
2.5	Condiciones de borde	6
2.6	Escalas hidrométricas y su referenciación	8
2.7	Calibración y validación del modelo	12
3	MODIFICACIONES AL MODELO ANTECEDENTE	16
3.1	Modificación del eje del modelo	16
3.2	Reubicación de secciones transversales y escalas hidrométricas	19
3.3	Redefinición de curvas de parámetros de las secciones	22
3.4	Redefinición de anchos de la planicie de inundación	22
3.5	Adecuación de condiciones de borde y condiciones iniciales	27
3.6	Modificación del cero del hidrómetro de Esquina	28
4	CONCLUSIONES	29

1 INTRODUCCIÓN

La Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico (SlyAH) del Instituto Nacional del Agua (INA), tiene como uno de sus objetivos principales el de comunicar, con la mayor antelación posible, la ocurrencia de crecidas y bajantes pronunciadas en la Cuenca del Plata a distintos organismos competentes del orden nacional y provincial, estableciéndose así como un eslabón de suma importancia en la cadena de alerta hidrológica de la región.

Una de las principales herramientas de este sistema es la simulación numérica. Para esto se cuenta con un modelo hidrodinámico unidimensional del Sistema Paraná / Paraguay que se utiliza para pronóstico hidrológico, propagando la onda de crecida proveniente de la alta cuenca del Paraná, que es donde se origina la mayor parte del caudal debido a las precipitaciones. Este modelo se basa en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant 1D, implementada en el software EZEIZA V desarrollado por el Programa de Hidráulica Computacional (PHC) del Laboratorio de Hidráulica (LHA) del INA (Pujol y Dolinkue, 1974; Menéndez et al., 1987; Menéndez, 1996). El tramo del río Paraná simulado con el modelo actual, se extiende desde el embalse de Yacyretá (Ituzaingó, Corrientes) hasta la ciudad de Villa Constitución (Santa Fe), mientras que el tramo del río Paraguay va desde Puerto Pilcomayo (Formosa) hasta su confluencia con el Paraná (Jaime y Menéndez, 1997; Jaime et al., 2000). La región que abarca el modelo se muestra en la Figura 1.1, donde se identifican los ejes de los ríos Paraguay y Paraná, siendo este último donde se enfatizó el análisis de este trabajo.

En general, la performance del modelo implementado, para las simulaciones del período 1994-2010, ha resultado satisfactoria tanto en lo que respecta a la representación de niveles como a la de caudales. A pesar de ello, se observan diferencias entre los resultados de las simulaciones respecto de las observaciones. Desde su implementación (Jaime y Menéndez, 1997; Jaime et al., 2000), el modelo ha tenido cambios menores. Acotar esas diferencias resulta de suma importancia para mejorar servicio de pronóstico hidrológico. Con ese objetivo es que se comenzaron con las tareas de adecuación en la geometría del modelo, trabajo que se describe en este informe.

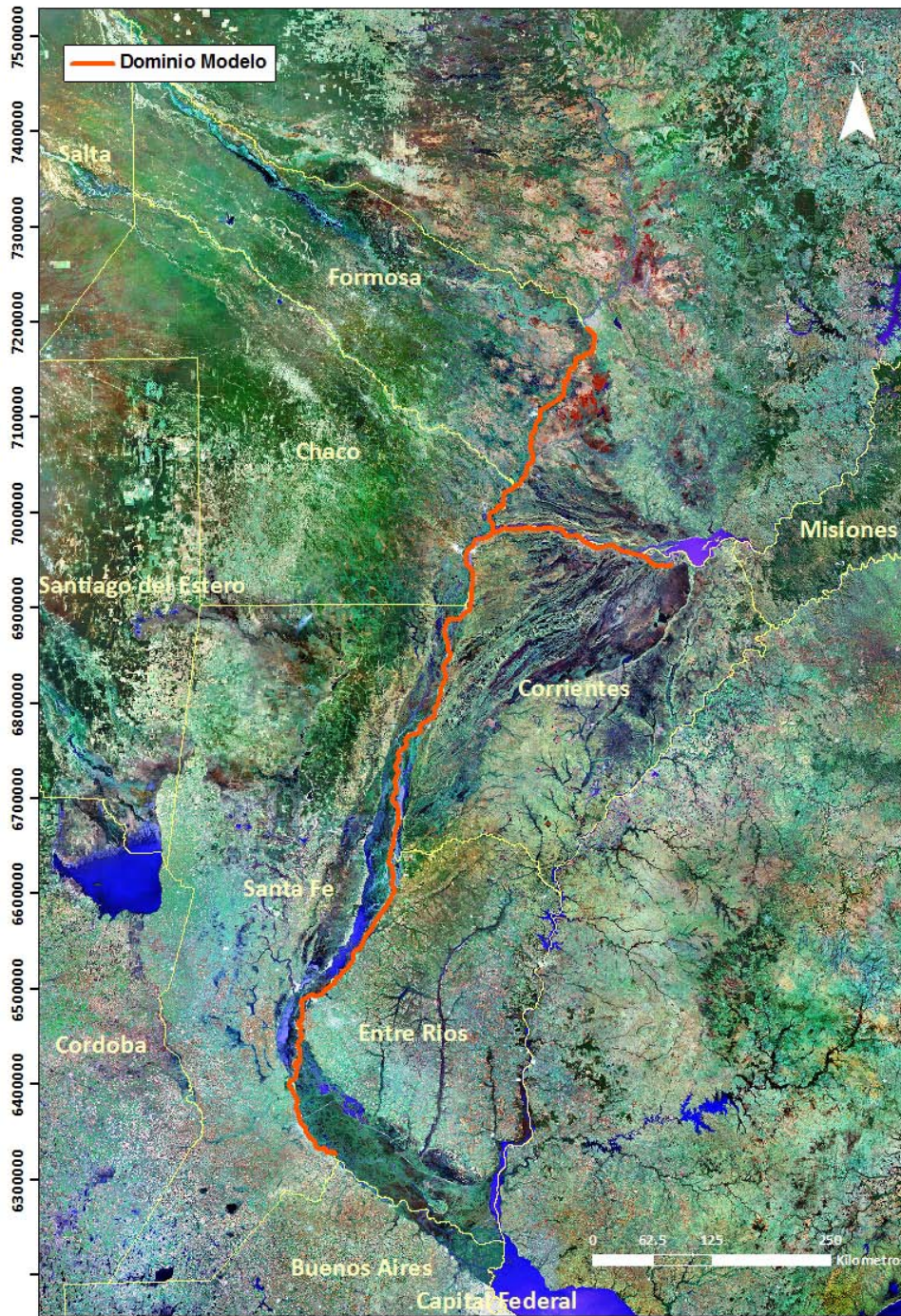


Figura 1.1. Dominio del modelo del río Paraná.

2 MODELO ANTECEDENTE

2.1 Sistema EZEIZA V

La implementación del modelo hidrodinámico del río Paraná para ser utilizado en pronósticos de la SlyAH se realizó con el sistema EZEIZA V. En este informe se presentan algunas características de la misma, encontrándose los detalles en Jaime y Menéndez (1997) y Jaime et al. (2000).

EZEIZA V es un sistema computacional para el cálculo de la traslación de ondas en ríos y canales, desarrollado en el INA desde la década de 1970 (Pujol y Dolinkue, 1974; Menéndez et al., 1987; Menéndez, 1996), y que se basa en la resolución de las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant, que constituyen la representación matemática de los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento. Estas ecuaciones forman un sistema hiperbólico de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que representan la evolución de ondas superficiales en aguas poco profundas, que se complementa con condiciones iniciales y de contorno. En régimen subcrítico, que es el caso típico de una red de canales, se especifican como condiciones de borde los niveles o caudales instantáneos en los contornos de ingreso al sistema y los niveles o las relaciones altura-caudal en las desembocaduras. Como condiciones iniciales, deben proveerse las distribuciones de nivel y caudal sobre todo el sistema. Las ecuaciones se resuelven numéricamente por el esquema implícito en diferencias finitas de Preissmann.

Para este modelo, se plantearon 2 tipos de filamentos, un filamento Tipo 1 para el Río Paraná y un filamento Tipo 2 para el Río Paraguay, tal como se resume en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos de filamentos del modelo

Filamento	Curso	Longitud [km]	Cantidad de Secciones	Condición Borde Aguas Arriba	Condición Borde Aguas Abajo
1	Paraná	1083	76	Q	H
2	Paraguay	376	77	H	-

La geometría del canal se provee a través de secciones transversales descritas como pares de coordenadas (distancia a margen izquierda, cota de fondo) y las respectivas progresivas siguiendo el thalweg. No obstante, el paso de cálculo espacial es constante, generando valores intermedios mediante una interpolación lineal entre las dos secciones más cercanas.

2.2 Parámetros numéricos

El sistema EZEIZA V opera con un paso de discretización espacial uniforme para cada filamento. Para este modelo se adoptó un paso de 5 km para ambos filamentos.

En cuanto al paso temporal, que surge de la relación entre el paso espacial y la velocidad media de escurrimiento, estimada en 0.80 m/s, resulta ser de aproximadamente 6000 segundos. No obstante fue adoptado un paso temporal sensiblemente menor, a saber $\Delta t=10$ minutos (600 segundos).

2.3 Coeficientes de rugosidad

La rugosidad del cauce, en el sistema EZEIZA V, se representa mediante el coeficiente de rugosidad de n de Manning. Este parámetro varía según sea el cauce principal o la planicie de inundación la superficie que ofrece resistencia al escurrimiento. Es por esto que para el cauce principal se utilizaron valores entre 0.020 y 0.035, y para las planicies de inundación valores de un orden de magnitud mayor. El coeficiente de rugosidad en el cauce fue utilizado como parámetro de calibración del modelo hidrodinámico.

2.4 Albardones

Los albardones son formaciones naturales generadas por los sedimentos finos que se depositan en las márgenes del cauce principal durante las crecidas. Este fenómeno se explica a partir de la disminución de velocidad del flujo al incrementar el área de escurrimiento. Estas estructuras establecen un umbral entre el escurrimiento en el cauce principal y la planicie de inundación durante eventos de crecidas.

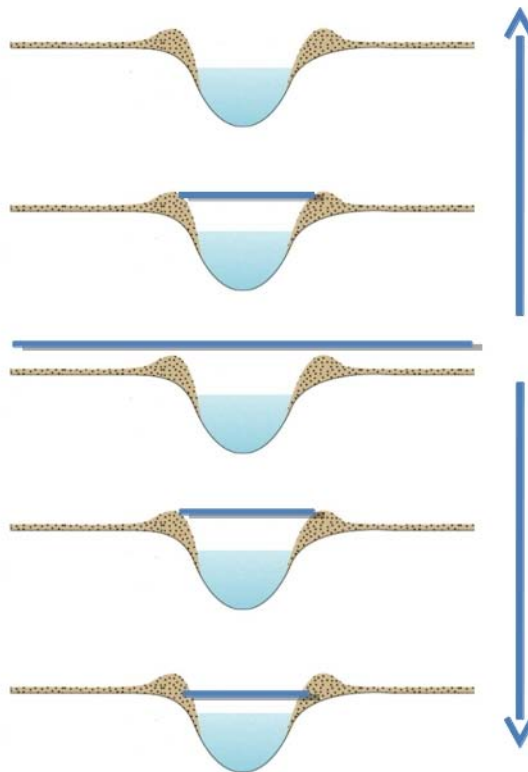


Figura 2.1. Esquema utilizado en la modelación (igual comportamiento de los parámetros geométricos e hidráulicos tanto para el ascenso y el descenso del nivel de agua).

Este proceso físico es tenido en cuenta en la modelación matemática del río Paraná (Figura 2.1). Para esto se define una cota de albardón, en aquellas secciones que lo tienen (principalmente Paraná Medio y Paraná Inferior), por encima de la cual la planicie es inundada (aun cuando ese nivel pueda ser superior a la cota de planicie). En el criterio actual de modelación, se considera que el albardón es de longitud infinita (problema plano), por lo tanto, la única forma de llenarse el valle es por desborde. Esta estrategia de modelación, una vez sobrepasado el nivel del albardón, incorpora instantáneamente a la sección mojada de un gran volumen de agua. Por lo tanto, la presencia del albardón modifica las curvas de parámetros geométricos e hidráulicos (Figura 2.2).



Figura 2.2. Curva del área de la Sección 46 con albardón y sin albardón.

2.5 Condiciones de borde

Para el río Paraná se ha utilizado como condición de borde de aguas arriba la serie de caudales medios diarios erogados en la presa de Yacyretá (Figura 2.3), mientras que aguas abajo fue utilizada como condición de borde la serie de alturas hidrométricas diarias registradas en la localidad de Villa Constitución (Figura 2.4).

En el río Paraguay la condición de borde de aguas arriba es la serie de niveles hidrométricos en Puerto Pilcomayo (Figura 2.5).

La información relevada y utilizada para la validación del modelo consistió en la serie de niveles hidrométricos observados en distintas estaciones de observación intermedias.

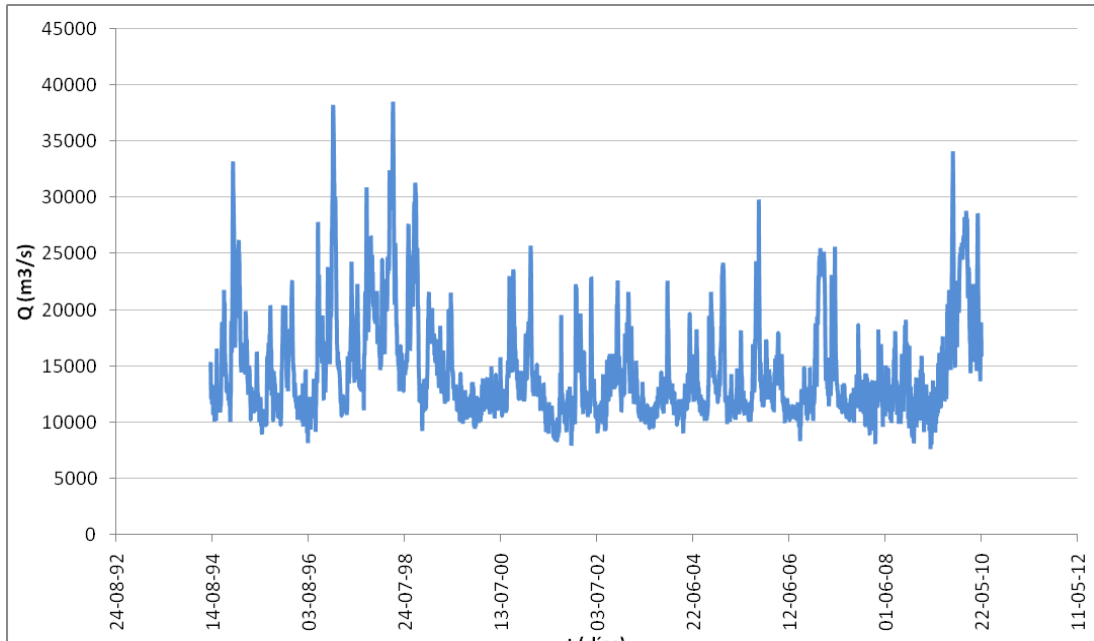


Figura 2.3. Caudales diarios erogados por la presa de Yacyretá.

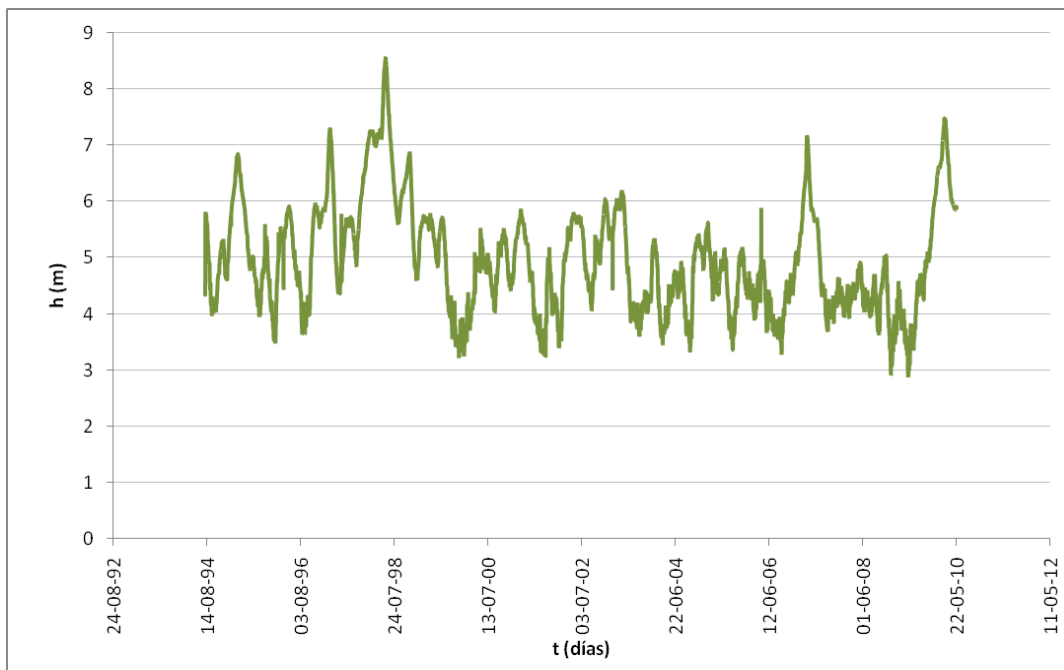


Figura 2.4. Niveles diarios del río Paraná, a la altura de Villa Constitución.

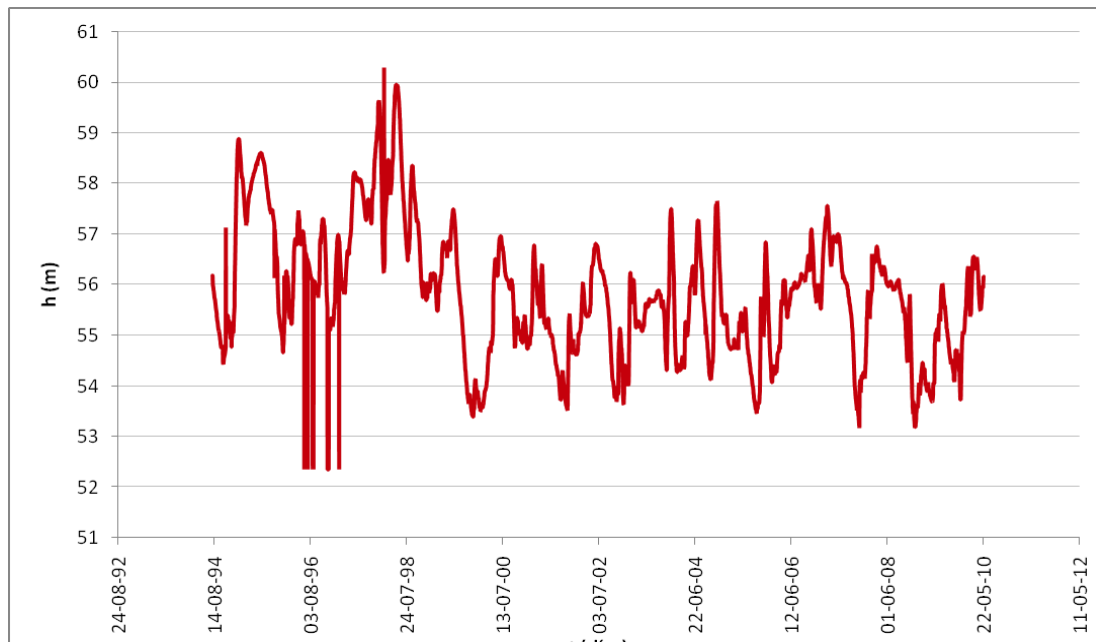


Figura 2.5. Niveles diarios del río Paraguay, a la altura de Puerto Pilcomayo.

2.6 Escalas hidrométricas y su referenciación

En las estaciones de seguimiento ubicadas sobre el río Paraná, quince en total, se encuentran escalas hidrométricas que acusan el nivel del río en esos puntos (Figura 2.6). Diariamente, estas escalas son relevadas por personal de Prefectura Naval Argentina (PNA) y la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables (SSPyVN) e informadas al SIyAH del INA. La serie de estos datos observados conforman la información de referencia para la calibración y control del performance del modelo.

Los ceros de esta escala presentan distintos valores según la fuente que se consulte (Cero MOP, Ministerio de Obras Públicas; Cero IGM, Instituto Geográfico Militar, actualmente IGN, Instituto Geográfico Nacional), así como varían también los ceros de referencia a los que están relacionados.

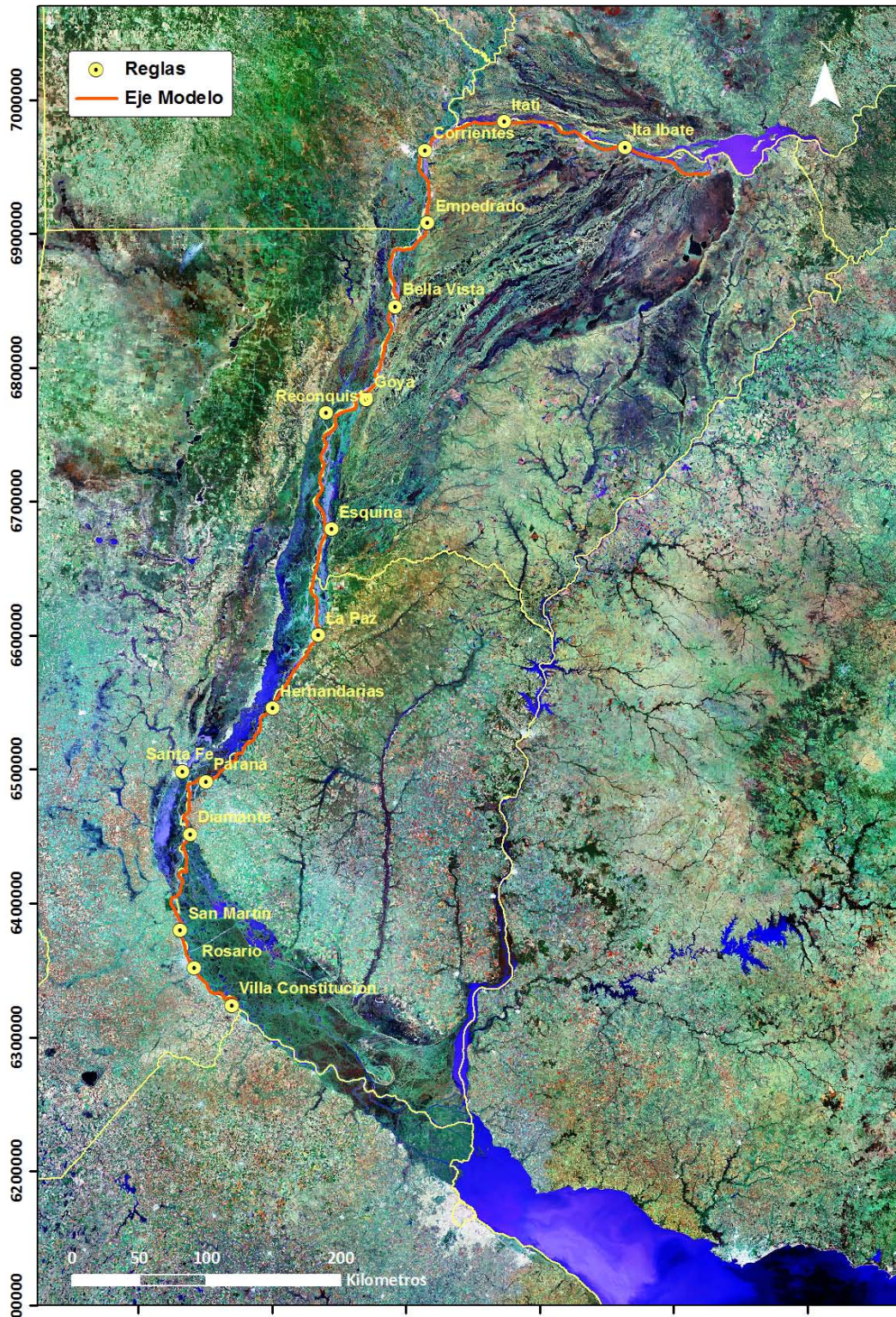


Figura 2.6. Estaciones de seguimiento.

En la Tabla 2.2 se presentan los ceros de escala adoptados para el modelo, las coordenadas correspondientes a dichas reglas (en el sistema Gauss-Krüger Faja 5 – Datum: POSGAR 94) y la fuente de información.

Tabla 2.2. Ceros de escala adoptados para las distintas estaciones de control.

Estación	Cota Cero[m MOP]	Cota Cero[m IGN]	Fuente de Información	Coordenada x	Coordenada y
Italbate	52.42	51.86	SSPyVN	5763743	6964596
Itati	45.66	45.10	SSPyVN	5673887	6983554
Corrientes	42.39	41.83	SSPyVN	5614776	6962424
Empedrado	39.68	39.12	SSPyVN	5616266	6908046
Bella Vista	34.74	34.18	SSPyVN	5592083	6845712
Goya	29.67	29.11	SSPyVN	5570737	6776543
Reconquista	27.68	27.12	SSPyVN	5540718	6766293
Esquina	22.03	21.47	DNVN y AyEE	5544700	6679629
La Paz	16.46	15.91	SSPyVN	5534657	6600404
Hernandarias	13.46	12.90	SSPyVN	5500768	6545878
Santa Fe	8.95	8.40	SSPyVN	5433194	6498662
Paraná	10.12	9.57	SSPyVN (web)	5450756	6491093
Diamante	7.32	6.76	SSPyVN (web)	5439120	6451783
San Martín	4.18	3.63	SSPyVN (web)	5431900	6380139
Rosario	3.59	3.03	SSPyVN (web)	5442243	6351999
Villa Constitución	2.68	2.13	SSPyVN (web)	5470052	6324092

En la Figura 2.7 se presentan las características y ubicaciones de las escalas hidrométricas utilizadas que se encuentran en la Ruta de Navegación Santa Fe al Océano.

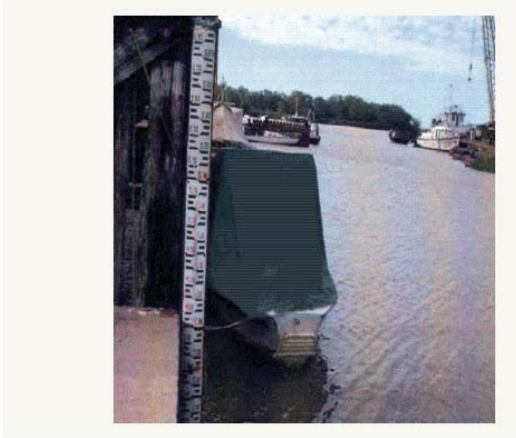
INFORMACIÓN DE RUTAS NAVEGABLES

Ruta Troncal Santa Fé - Océano.

DATOS DEL HIDRÓMETRO - VINCULACIÓN

PARANÁ
Río Paraná, Km 601, margen izquierda.

Referencia Altimétrica: Ménsula MOP RN292, cota = + 17,7043 m.
Nivel de reducción Local = + 10,154 m.
Cota del Cero de la Escala = + 10,121 m.



a) Paraná

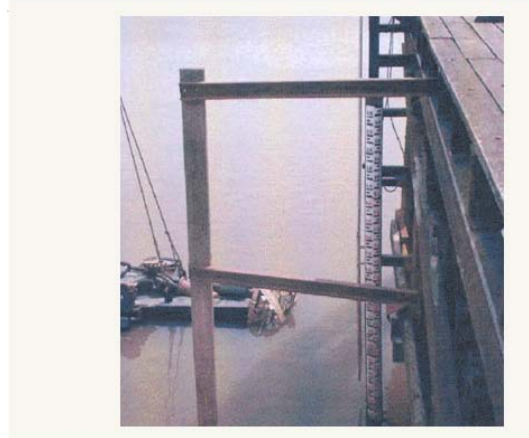
INFORMACIÓN DE RUTAS NAVEGABLES

Ruta Troncal Santa Fé - Océano.

DATOS DEL HIDRÓMETRO - VINCULACIÓN

DIAMANTE
Río Paraná, Km 533, margen izquierda.

Referencia Altimétrica: Ménsula MOP RN812, cota = + 7,5225 m.
Nivel de reducción Local = + 7,301 m.
Cota del Cero de la Escala = + 7,319 m.



b) Diamante

INFORMACIÓN DE RUTAS NAVEGABLES

Ruta Troncal Santa Fé - Océano.

DATOS DEL HIDRÓMETRO - VINCULACIÓN

ROSARIO
Río Paraná, Km 416, margen derecha.

Referencia Altimétrica: Ménsula MOP RN309, cota = + 11,2469 m.
Mojón IGM PF1n(82)l, cota (MOP) = + 11,142 m.
Nivel de reducción Local = + 3,600 m.
Cota del Cero de la Escala = + 3,588 m.



c) Rosario

INFORMACIÓN DE RUTAS NAVEGABLES

Ruta Troncal Santa Fé - Océano.

DATOS DEL HIDRÓMETRO - VINCULACIÓN

VILLA CONSTITUCIÓN
Río Paraná, Km 368, margen derecha.

Referencia Altimétrica: Ménsula MOP s/n fijada al mástil, cota = + 9,574 m.
Nivel de reducción Local = + 2,684 m.
Cota del Cero de la Escala = + 2,684 m.



d) Villa Constitución

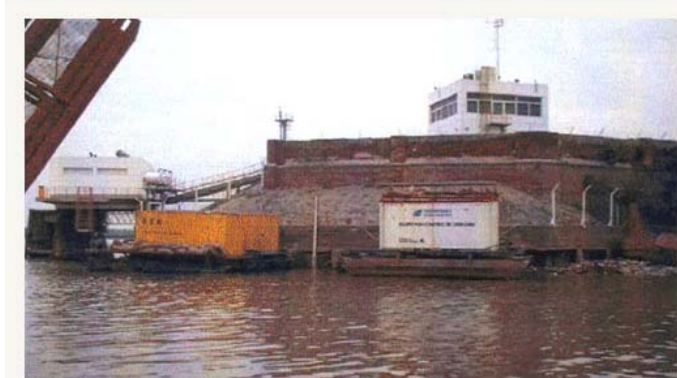
INFORMACIÓN DE RUTAS NAVEGABLES

Ruta Troncal Santa Fé - Océano.

DATOS DEL HIDRÓMETRO - VINCULACIÓN

SAN MARTÍN
Río Paraná, Km 448, margen derecha.

Referencia Altimétrica: Ménsula MOP RN1748, cota = + 11,5496 m.
Nivel de reducción Local = + 4,194 m.
Cota del Cero de la Escala = + 4,181 m.



e) San Martín

Figura 2.7. Imágenes de escalas hidrométricas de la Ruta de Navegación Santa Fe al Océano.

2.7 Calibración y validación del modelo

La calibración del modelo fue efectuada en base a la comparación de niveles registrados y simulados, siendo los parámetros de ajuste el coeficiente de rugosidad n de Manning y el nivel de albardones.

Para la calibración del coeficiente n de Manning del cauce principal se utilizó la serie marzo 1996 – octubre 1996, correspondiente a un período de aguas bajas. Mientras que la serie octubre 1996 – marzo 1997 presentó un período de crecidas, el cual se utilizó para la calibración del coeficiente n de Manning de las planicies de inundación y el nivel de los albardones.

Luego, el período octubre 1994 – diciembre 1995 constituyó el escenario de validación de los valores obtenidos a partir de las corridas de calibración (Jaime et al., 2000).

Los valores de n de Manning utilizados para el cauce fueron 0.034, 0.035, 0.031, 0.028, 0.022 y 0.020; mientras que las planicies de inundación se utilizaron 0.200 y 0.120 (Figura 2.8). En la tabla 2.3 se presentan, para cada sección del Río Paraná los valores del coeficiente n de Manning para el cauce principal y de nivel de albardón luego del proceso de calibración.

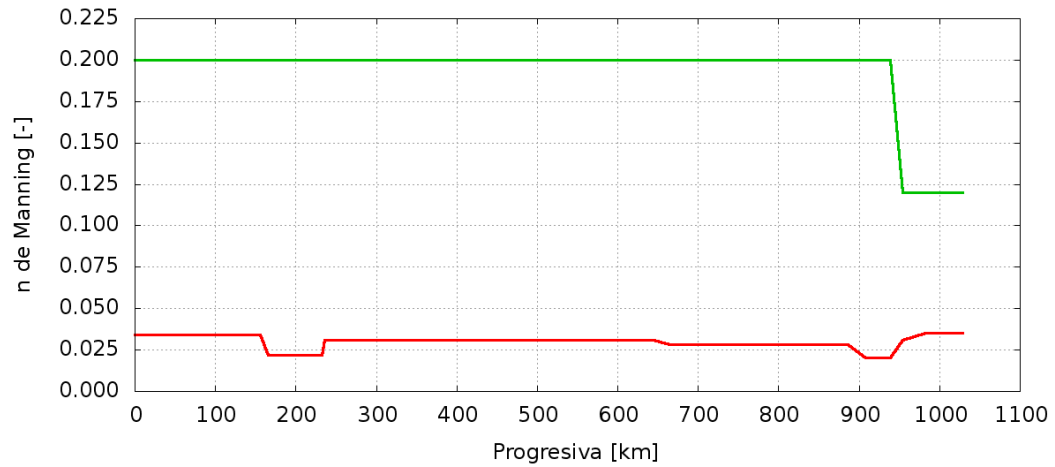


Figura 2.8. Coeficientes de rugosidad de cauce y planicie.

Tabla 2.3. Progresivas, coeficientes n de Manning y niveles de albardón para las secciones del Río Paraná.

Sección	Progresiva [Km]	Coefficiente n de Manning	Nivel Albardón [m]
ITUZAINGO	0.00	0.034	-
PS23	42.07	0.034	-
PS22	46.34	0.034	-
PS20	65.54	0.034	-
PS19	70.58	0.034	-
PERFIL26	78.05	0.034	-
PS18	80.08	0.034	-
PS17	85.97	0.034	-
PEROS16	95.09	0.034	-
CERRITO	102.41	0.034	-
CESTE	114.64	0.034	-
COESTE	122.88	0.034	-
GUAZU	138.60	0.034	-
LENGUAE	148.07	0.034	-
LENGUAO	156.07	0.034	-
PS06	166.09	0.022	-
BOBYESTE	175.86	0.022	-
BOBOESTE	188.84	0.022	-

BNU	197.67	0.022	-
PM101	203.70	0.022	-
ENT-PARA	207.44	0.022	-
PM99	214.80	0.022	-
PM97	223.43	0.022	-
PM96	231.99	0.022	-
CORRIENTES	236.30	0.031	48.0
CORR-PUENTE	238.30	0.031	47.9
RIACHUELO	262.98	0.031	47.5
TRES MARÍAS	281.34	0.031	46.8
EMPEDRADO	299.08	0.031	46.0
PIRATAPE	317.18	0.031	44.3
PIRACUACITO	354.60	0.031	42.5
BELLA VISTA	378.98	0.031	39.8
LAS CUEVAS	403.99	0.031	38.0
PASTORIL	416.48	0.031	36.5
LAVALLE	428.11	0.031	35.4
GOYA	457.89	0.031	34.0
RECO-REY	480.89	0.031	32.7
RECONQUISTA	483.89	0.031	32.5
LVPJROBL	495.55	0.031	31.4
LOS VASCOS	499.55	0.031	31.2
RO-MALABRIGO	505.55	0.031	30.9
ROMANG	521.83	0.031	30.6
EL CEIBO	536.74	0.031	30.1
MACHUCA	559.54	0.031	29.2
ES-CORRI	575.55	0.031	27.7
ESQUINA	578.56	0.031	27.5
LA CARLOTA	599.99	0.031	25.8
GU-GUAYQ	606.21	0.031	24.2
GUAYQUIRARO	618.22	0.031	23.4
SANTA CRUZ	634.23	0.031	23.3
SAN JAVIER	645.13	0.031	22.0
LA PAZ	664.76	0.028	20.7
SAN JOAQUIN	679.75	0.028	19.2

SANTA ELENA	697.01	0.028	18.5
EL LAUREL	708.20	0.028	17.9
HER-FELICIANO	717.40	0.028	18.4
HERNANDARIAS	728.41	0.028	17.0
BRUGO	751.70	0.028	16.3
CURTIEMBRE	764.65	0.028	15.9
CHAPETÓN	779.92	0.028	15.3
PTO.CELINA	788.79	0.028	15.0
VA. URQUIZA	797.36	0.028	14.7
ISLA VACÍA	801.39	0.028	14.5
TUNEL	807.43	0.028	14.3
ISLA PUE	809.41	0.028	14.2
BAJADA SALADO	814.42	0.028	14.1
BAJADA GRANDE	816.42	0.028	14.0
ORO VERDE	833.66	0.028	-
ALVEAR	849.58	0.028	-
DIAMANTE	873.69	0.028	-
ARAGON	886.66	0.028	-
MONJE	907.79	0.020	-
OLIVEROS	938.79	0.020	-
SAN LORENZO	954.63	0.031	-
ROSARIO	983.00	0.035	-
VILLA CONSTITUCION	1029.10	0.035	-

3 MODIFICACIONES AL MODELO ANTECEDENTE

3.1 Modificación del eje del modelo

Como se observó en el capítulo anterior, el eje del río utilizado en el modelo original del Paraná fue determinado utilizando información de distinta precisión que la que actualmente se dispone. Es por esto que fue necesario adecuar el trazado del eje del río, utilizando nuevas herramientas que brindaran una mayor certeza al trabajo realizado. La metodología utilizada consistió en la aplicación conjunta de las siguientes herramientas:

- Imágenes satelitales (*Google Earth*)
- Imágenes satelitales procesadas (Programa Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica, SSRRySIG, del INA)
- Cartas Náuticas (Servicio de Hidrografía Naval, SHN)
- Modelo Digital del Terreno (Farr et al., 2007)

En la Figura 3.1 se observa cómo el eje original no coincide con la traza del río presentada en las Cartas Náuticas del SHN. En la Figuras 3.2 se muestra la ubicación del eje modificado a lo largo de toda la extensión del modelo.

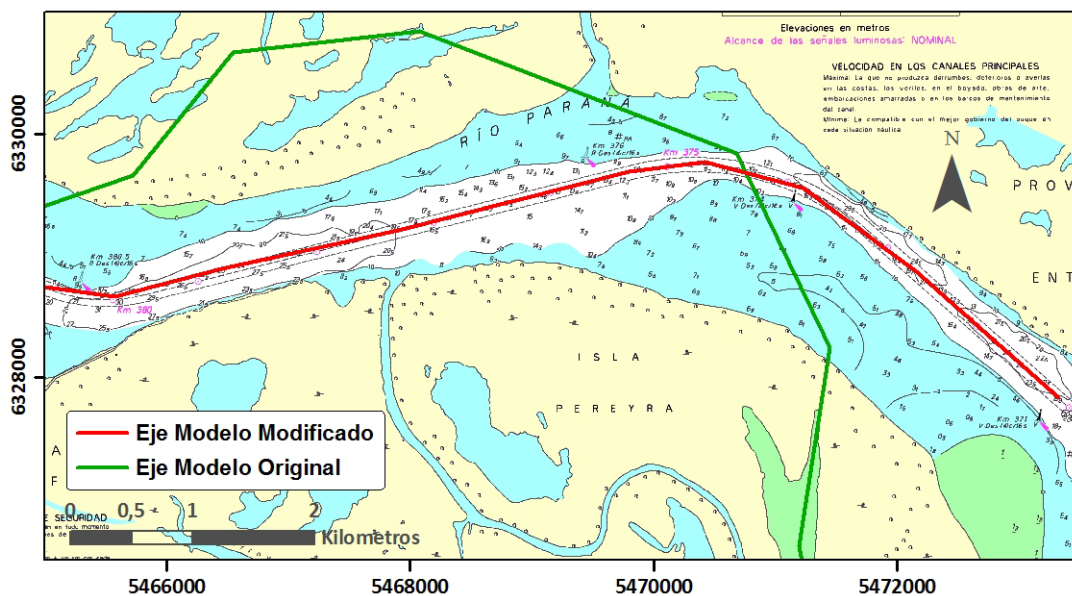
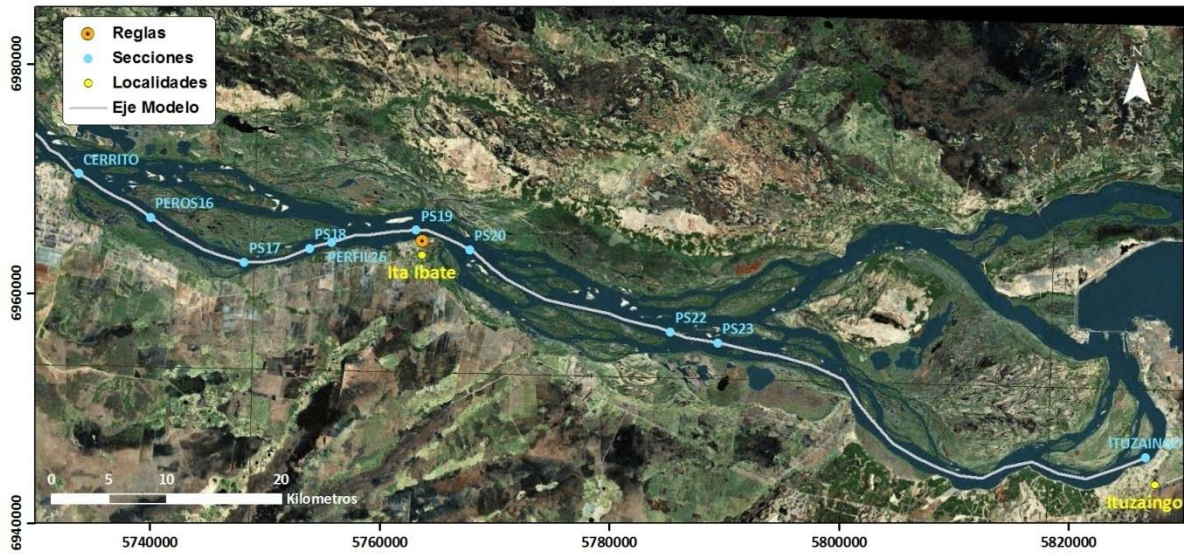
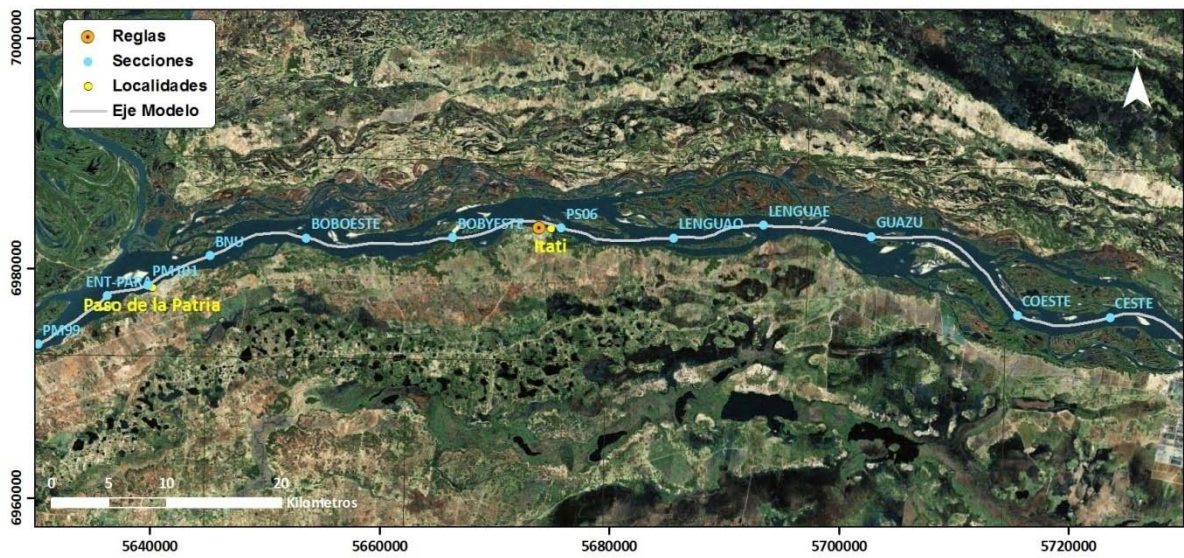


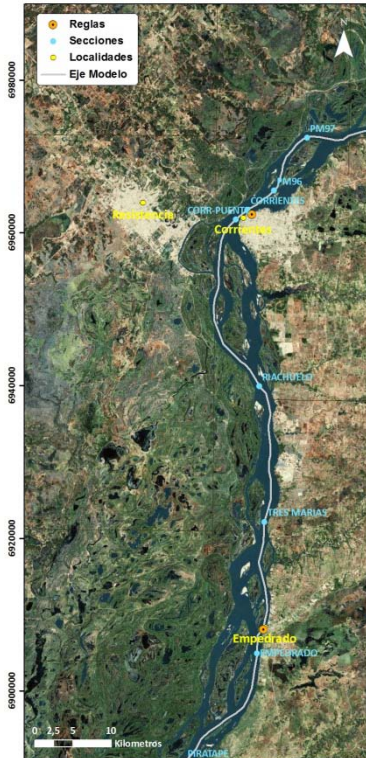
Figura 3.1. Carta náutica en las cercanías de Villa Constitución junto con los ejes original y modificado.



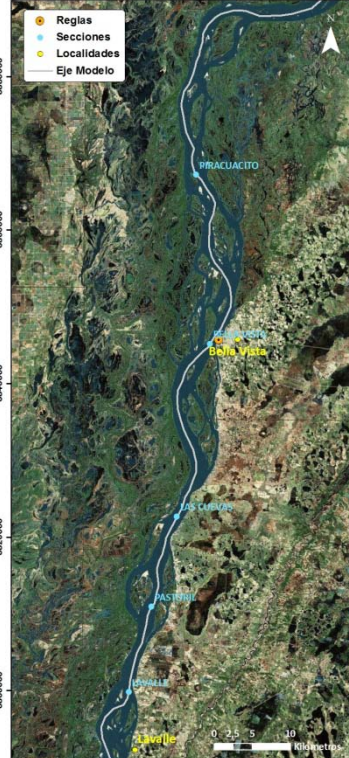
a)



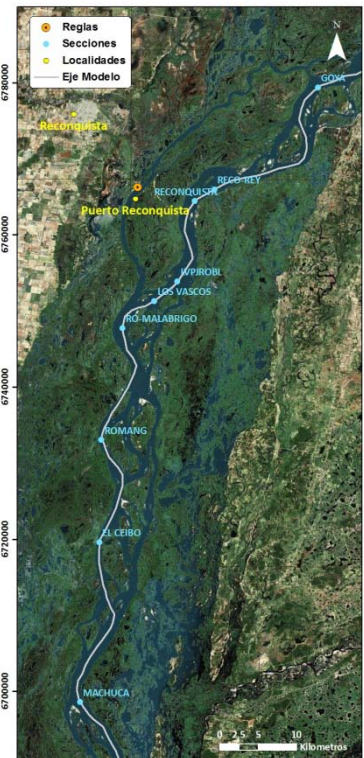
b)



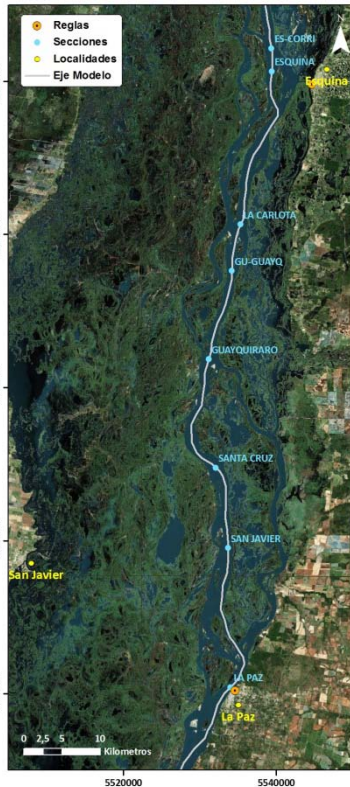
c)



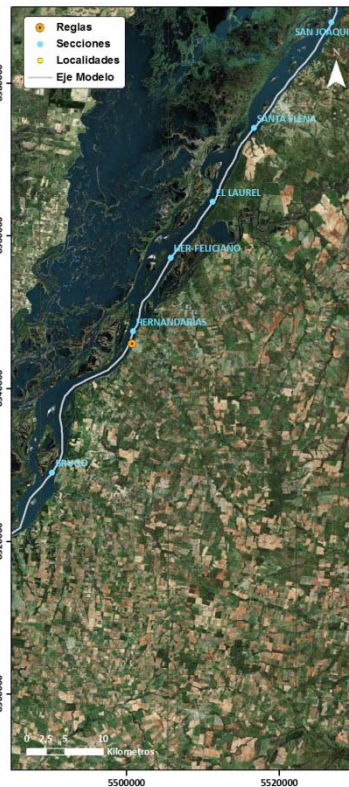
d)



e)



f)



g)



h)

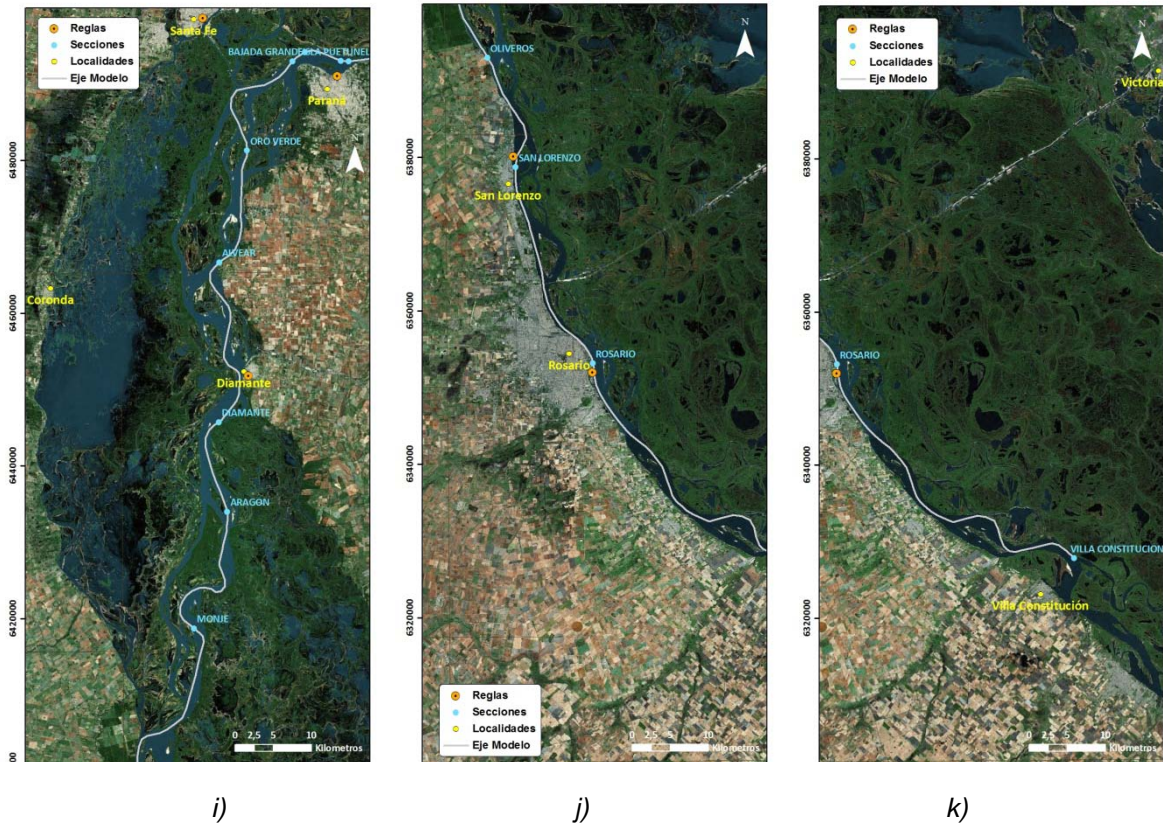


Figura 3.2. Ubicación nuevo eje.

3.2 Reubicación de secciones transversales y escalas hidrométricas

Para ubicar las secciones transversales en su posición correcta y luego definir su progresiva según la nueva traza del eje del río, se recurrió a los planos incorporados en el informe *Modelo Hidrodinámico del Río Paraná, desde Yacyretá hasta la ciudad de Paraná* (Jaime et al., 1997). En estas figuras se volcaron las secciones según los relevamientos originales realizados sobre el río, por lo que se utilizó como referencia para ubicar las secciones en *Google Earth* (a partir de islas o formas particulares de las márgenes en las cercanías) y de esta forma poder incorporarlas al conjunto de datos en el SIG (Sistema de Información Geográfica).

Una vez realizada esta tarea se pudieron medir mediante un software de tipo CAD (*computer aided-design*), las distancias parciales entre las secciones y se obtuvieron las nuevas progresivas correspondientes. El eje modificado resultó así de una longitud de 54 km menor al eje original. En la Tabla 3.1 se resumen las 76 secciones del tramo Paraná con las progresivas correspondientes al eje original y al eje modificado.

Tabla 3.1. Progresivas de las secciones ubicadas sobre el Río Paraná (en km).

Sección	Original	Modificada	Sección	Original	Modificada
ITUZAINGO	0	0.00	LVPJROBL	527	495.55
PS23	38	42.07	LOS VASCOS	531	499.55
PS22	48	46.34	RO-MALABRIGO	537	505.55
PS20	71	65.54	ROMANG	542	521.83
PS19	74	70.58	EL CEIBO	552	536.74
PERFIL26	81	78.05	MACHUCA	568	559.54
PS18	83	80.08	ES-CORRI	598	575.55
PS17	86	85.97	ESQUINA	601	578.56
PEROS16	94	95.09	LA CARLOTA	625	599.99
CERRITO	102	102.41	GU-GUAYQ	647	606.21
CESTE	113	114.64	GUAYQUIRARO	659	618.22
COESTE	125	122.88	SANTA CRUZ	661	634.23
GUAZU	140	138.60	SAN JAVIER	679	645.13
LENGUAE	153	148.07	LA PAZ	697	664.76
LENGUAO	156	156.07	SAN JOAQUIN	716	679.75
PS06	175	166.09	SANTA ELENA	725	697.01
BOBYESTE	181	175.86	EL LAUREL	740	708.20
BOBOESTE	194	188.84	HER-FELICIANO	754	717.40
BNU	207	197.67	HERNANDARIAS	765	728.41
PM101	214	203.70	BRUGO	788	751.70
ENT-PARA	218	207.44	CURTIEMBRE	799	764.65
PM99	224	214.80	CHAPETÓN	817	779.92
PM97	235	223.43	PTO.CELINA	826	788.79
PM96	241	231.99	VA. URQUIZA	836	797.36
CORRIENTES	246	236.30	ISLA VACÍA	844	801.39
CORR-PUENTE	248	238.30	TUNEL	851	807.43
RIACHUELO	264	262.98	ISLA PUE	852	809.41
TRES MARÍAS	287	281.34	BAJADA SALADO	857	814.42
EMPEDRADO	315	299.08	BAJADA GRANDE	859	816.42
PIRATAPE	338	317.18	ORO VERDE	875	833.66
PIRACUACITO	361	354.60	ALVEAR	892	849.58
BELLA VISTA	397	378.98	DIAMANTE	919	873.69
LAS CUEVAS	423	403.99	ARAGON	936	886.66
PASTORIL	446	416.48	MONJE	959	907.79
LAVALLE	461	428.11	OLIVEROS	986	938.79
GOYA	482	457.89	SAN LORENZO	1003	954.63
RECO-REY	503	480.89	ROSARIO	1033	983.00
RECONQUISTA	506	483.89	V.CONSTITUCIÓN	1083	1029.10

Para ubicar las escalas hidrométricas, se utilizaron diversas fuentes, según el caso. Por ejemplo, para la estación de Rosario, se contaba con las cartas náuticas en la zona, donde se identifica la ubicación de la regla en el puerto de esa ciudad, como se observa en la Figura 3.3.

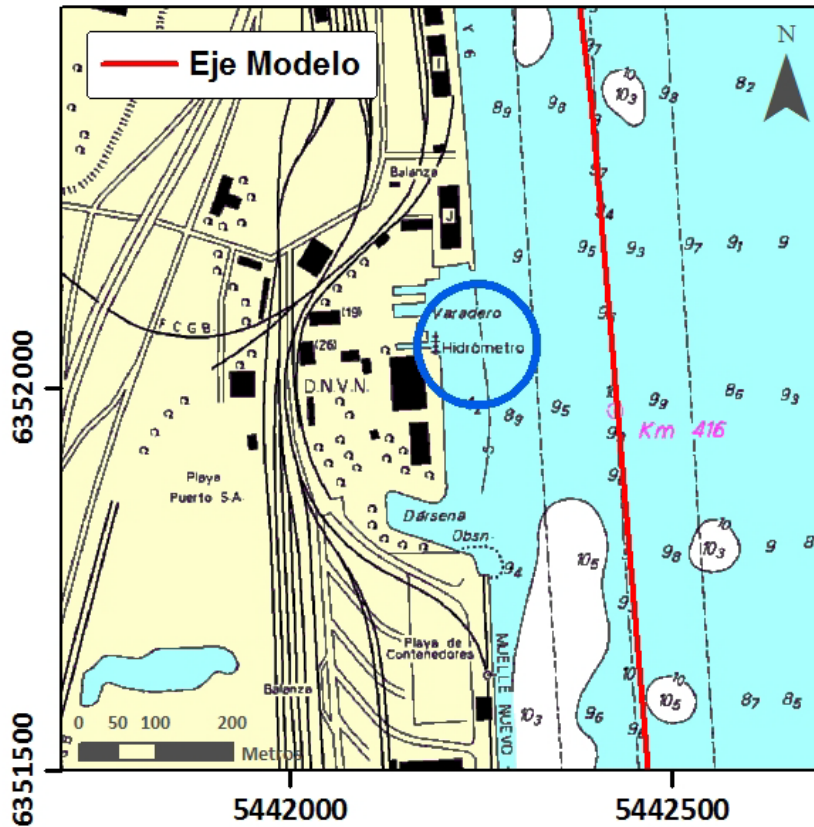


Figura 3.3. Carta náutica en cercanías del puerto de Rosario, donde se identifica la escala hidrométrica.

Las otras escalas hidrométricas fueron ubicadas de acuerdo a información de cartas náuticas, información solicitada a Prefectura Naval Argentina (PNA) y archivos de la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables de la Nación (SSPyVN). Una vez ubicadas las reglas, se midieron las progresivas correspondientes al nuevo trazado del eje, las cuales se presentan en la Tabla 3.2. La progresiva 0 corresponde a la sección 'ITUZAINGO'.

Tabla 3.2. Escalas hidrométricas y sus progresivas.

Orden	Escala	Progresiva original [Km]	Progresiva modificada [Km]
1	ITA-ITAIBATE	74	70.06
2	ITATI	175	168.05
3	CORRIENTES	246	236.18
4	EMPEDRADO	315	296.15
5	BELLA VISTA	397	377.92
6	GOYA	482	454.82
7	RECONQUISTA	506	483.89
8	ESQUINA	601	580.77
9	LA PAZ	697	664.55
10	HERNANDARIAS	765	729.97
11	PARANA	858.5	809.37
12	SANTA FE	859	817.51
13	DIAMANTE	919	866.79
14	SAN MARTÍN	1003	953.26
15	ROSARIO	1033	984.17

3.3 Redefinición de curvas de parámetros de las secciones

Durante la revisión de las curvas de parámetros geométricos e hidráulicos de todas las secciones del río Paraná para distintas cotas, se encontraron algunas inconsistencias que tenían que ver con la asignación de valores de rugosidad y con la definición de la progresiva transversal.

Las secciones revisadas y corregidas se presentan en el Anexo I.

3.4 Redefinición de anchos de la planicie de inundación

Se propuso chequear que los anchos de la planicie de inundación de cada sección sean similares a los reales. Para esto, se empleó una técnica mediante basada en la utilización de imágenes satelitales de la zona de estudio durante una época de crecida, determinado máscaras de agua de la región.

Las imágenes utilizadas corresponden a la misión satelital LANDSAT 7. Esta misión, presenta una distribución de imágenes global, y cada imagen se identifica a través de su *path* y *row* (números identificatorios de la grilla barrida). En la Figura 3.4 se muestra la distribución de los mismos en la región de estudio. Las imágenes utilizadas fueron las correspondientes a los siguientes *path* y *row*: 226-80, 226-81, 226-82, 227-80, cuyo procesamiento fue realizado por el equipo del SSRRySIG del INA.

Una máscara de agua es un producto que identifica unidades de terreno que por su comportamiento espectral pueden ser categorizadas como cubiertas por agua. Para obtenerlas, es necesario realizar las siguientes tareas:

- Procesamiento de las imágenes (correcciones geométricas y atmosféricas)
- Clasificación de imágenes (métodos no supervisados)
- Análisis estadísticos (histogramas de variables de referencia, índices espectrales)

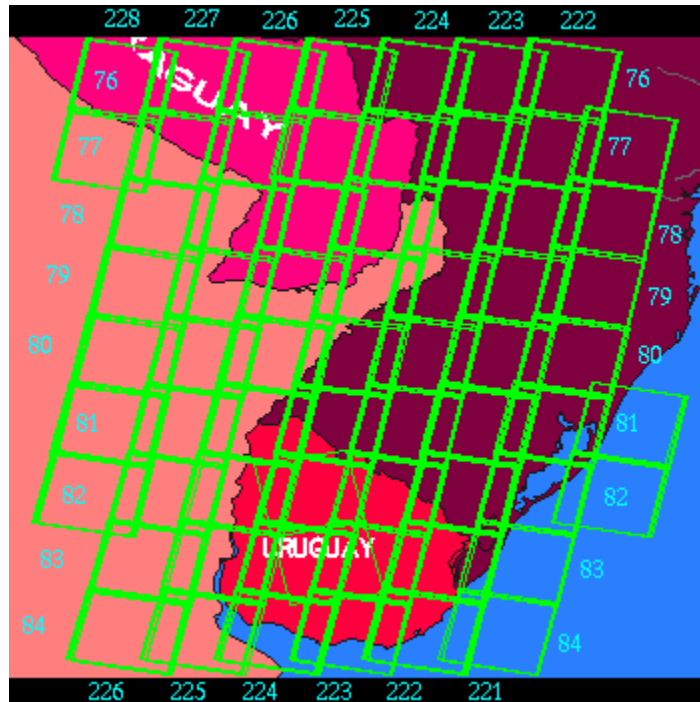


Figura 3.4. Paths y rows del litoral argentino.

Los *path* faltantes para realizar el análisis completo de ancho de planicie en todo el recorrido estudiado del Paraná fueron el 227-82 y 227-83. Es por esto que las planicies de algunas secciones no fueron revisadas. En la Figura 3.5, se presentan las máscaras de agua utilizadas, que representan las áreas inundadas durante la crecida de 1998.

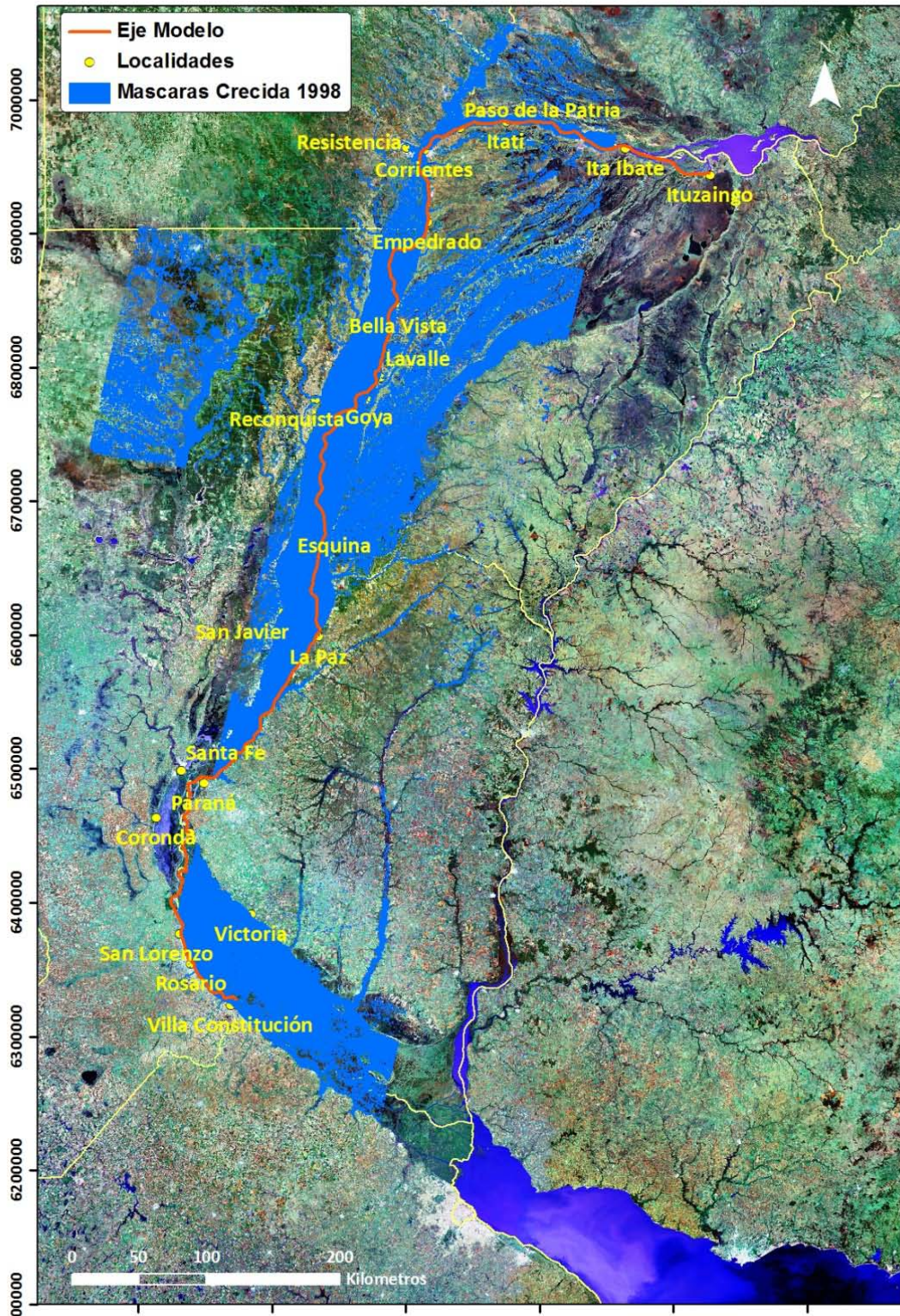


Figura 3.5. Máscara de agua en el área de estudio en la crecida de 1998.

En la figura 3.6 se muestra por ejemplo la ubicación de la sección 'SANTA CRUZ', y la definición del ancho del valle de inundación en función de la máscara de agua.

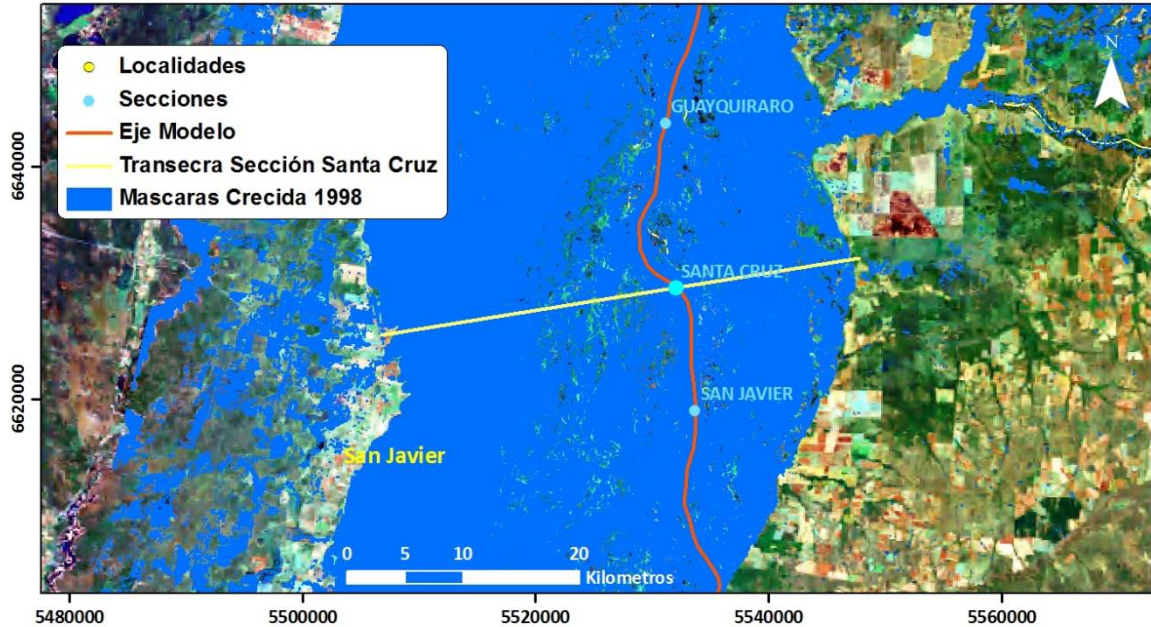


Figura 3.6. Ancho de la planicie de inundación en la sección 'SANTA CRUZ'.

La metodología implementada consistió en comparar las distancias respectivas de cada margen del río hacia el punto correspondiente al thalweg. Esas distancias fueron medidas en dirección transversal al curso, y se compararon las secciones incorporadas al modelo. Aquellos anchos de sección que diferían de calculado con esta metodología fueron modificados. En la Tabla 3.3 se presentan las secciones que sufrieron alguna modificación en el ancho de la planicie de inundación.

A modo de ilustración, se presenta en la Figura 3.7 la modificación realizada sobre la sección 'RO-MALABRIGO', donde se aumentó el ancho de la planicie de inundación en 2000 metros, de manera de alcanzar la longitud observada a partir de las máscaras de agua.

Tabla 3.3. Secciones con modificaciones en su planicie de inundación. Modificación de la sección (extensión (+) y contracción (-))

#	Nombre	Progresiva [Km]	Modificación [m]
27	RIACHUELO	262.98	-6950
28	TRES MARÍAS	281.34	-17400
29	EMPEDRADO	299.08	-10500
35	LAVALLE	428.11	+9000
36	GOYA	457.89	+13000
37	RECO-REY	480.89	+7000
38	RECONQUISTA	483.89	+7000
41	RO-MALABRIGO	505.55	+2000
42	ROMANG	521.83	+2000
43	EL CEIBO	536.74	+3000
44	MACHUCA	559.54	+2000
45	ES-CORRI	575.55	+4000
48	GU-GUAYQ	606.21	-4000
49	GUAYQUIRARO	618.22	+3000
50	SANTA CRUZ	634.23	+2000
58	BRUGO	751.70	+2000
59	CURTIEMBRE	764.65	+1000

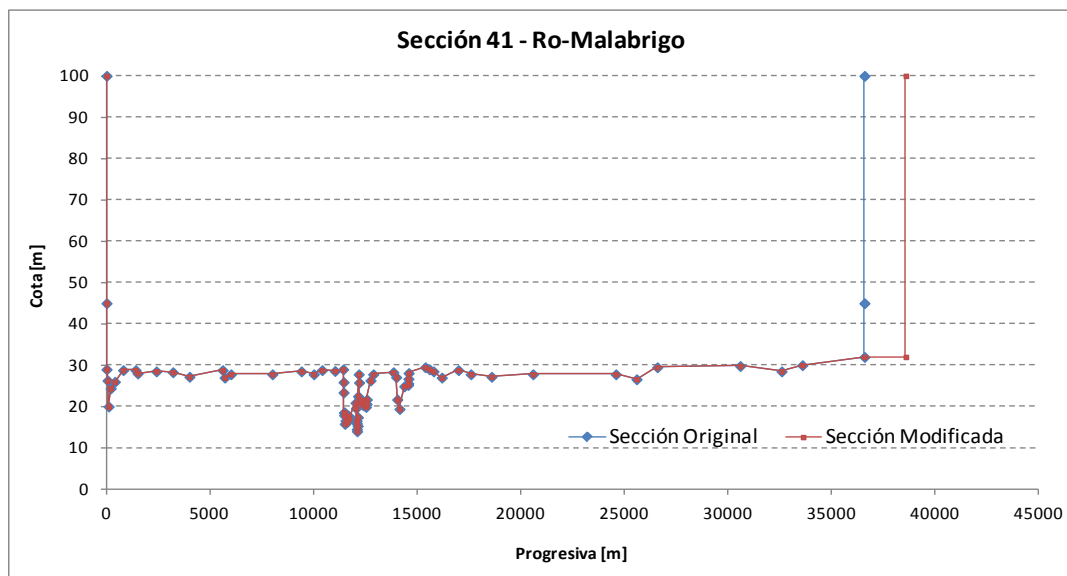


Figura 3.7. Ejemplo de redefinición de ancho de la planicie.

3.5 Adecuación de condiciones de borde y condiciones iniciales

A partir de información revisada de los caudales erogados por la presa de Yacyretá y de los niveles registrados en Villa Constitución (condiciones de borde del modelo), se revisaron las series utilizadas en la modelación. En el caso de la serie de caudales erogados por Yacyretá se encontraron dos grandes ventanas de tiempo (1996-1998 y 2008-2009) con importantes diferencias (Figura 3.8). Para la serie de niveles en Villa Constitución, las diferencias encontradas fueron en los mismos períodos (Figura 3.9).

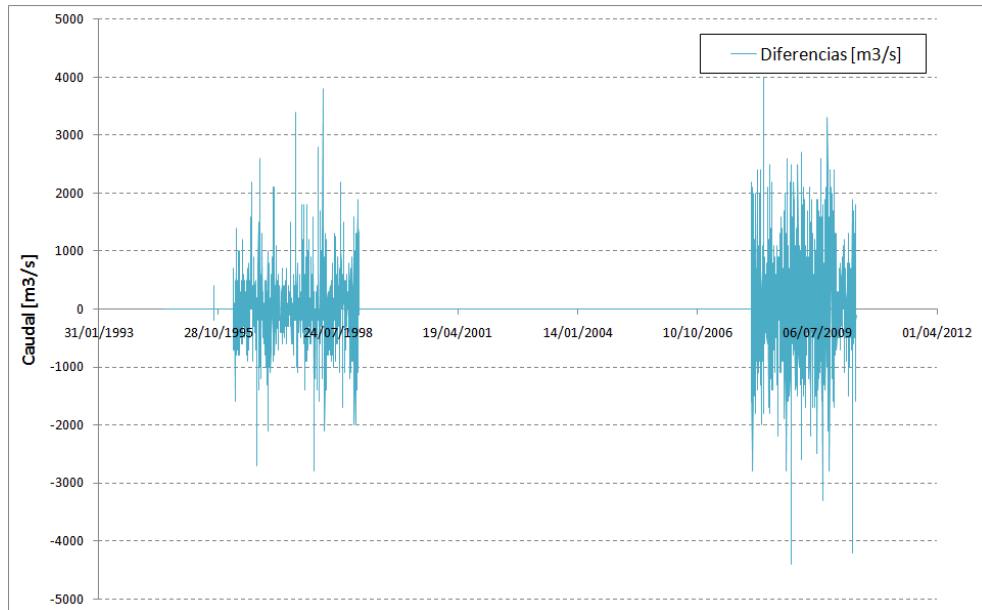


Figura 3.8. Diferencias de caudales erogados por la presa de Yacyretá.



Figura 3.9. Diferencias de niveles en Villa Constitución.

Por otro lado, se realizó una interpolación de la condición inicial original, para adecuarla a la longitud modificada del eje, que como se explicó anteriormente, pasó de 1083 a 1029 kilómetros.

3.6 Modificación del cero del hidrómetro de Esquina

Luego de observar los resultados de las simulaciones en la estación Esquina, se identificó un error sistemático que se dedujo que correspondía a la incorrecta definición del cero de referencia de la escala en dicho punto.

La Figura 3.10 ilustra la situación mencionada, donde puede observarse un desfase prácticamente uniforme entre datos observados y simulados.

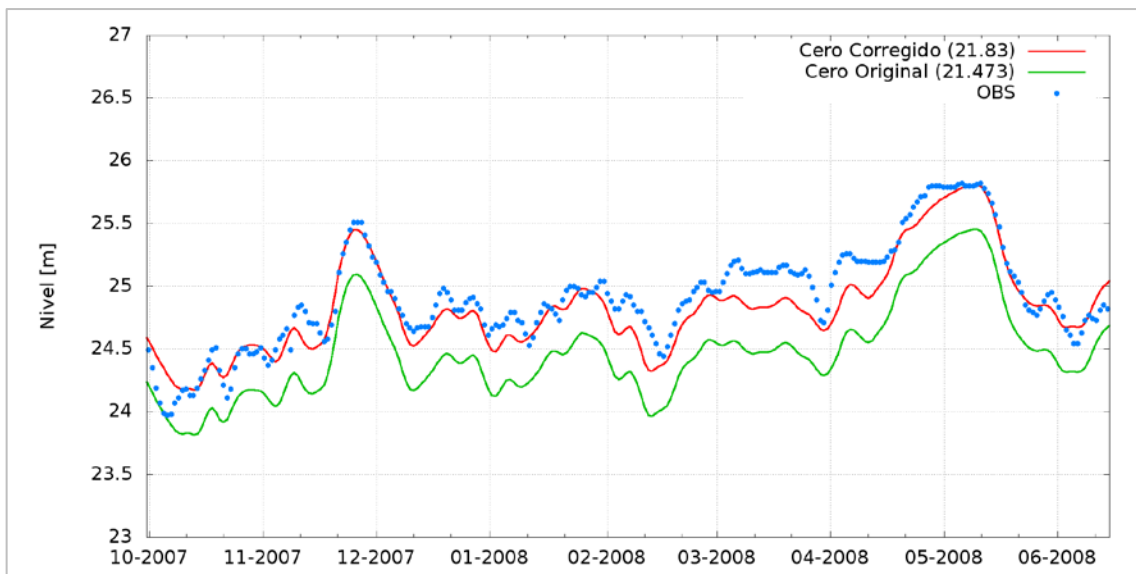


Figura 3.10. Error sistemático entre niveles observados y simulados en la estación Esquina.

Por esto se decidió modificar el cero de escala de Esquina, pasando de 21.47 (m IGM) a 21.83 (m IGM), adoptándose la referencia que se informa en Jaime et al.(1997) e incorporada en la Tabla 2.2.

4 CONCLUSIONES

Se construyó una base de datos tipo SIG con el objetivo de ordenar la información georreferenciada generada durante este trabajo, facilitando su manejo y posibilitando una sencilla incorporación de nueva información. Las 76 secciones del modelo hidrodinámico y las 15 escalas hidrométricas del río Paraná poseen su referencia geográfica, así como la traza del eje del modelo.

Se revisaron la ubicación y los ceros de las escalas hidrométricas del río Paraná dentro del dominio del modelo a partir de información provista por la SSPyVN, la PNA, y numerosos aportes del SlyAH.

La traza original del eje del río Paraná, fue recalculada a partir de la utilización herramientas con mayor precisión, obteniéndose una longitud total del tramo modelado del río Paraná de 1029 km, unos 54 km menos que la traza original. A partir de esta modificación fue necesario reubicar, en cuanto a sus progresivas, a las secciones transversales y las escalas hidrométricas.

La revisión de cada una de las curvas de parámetros geométricos e hidráulicos de todas las secciones del río Paraná, mostró en algunas secciones inconsistencias que tenían que ver con la asignación de valores de rugosidad y con la definición de la progresiva transversal.

Se verificaron los anchos de planicie de inundación de todas las secciones del modelo en el río Paraná a partir de la utilización de máscaras de agua, modificándose aquellos anchos que lo requirieron.

REFERENCIAS

- Farr, T.G., et al., 2007, The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Jaime, P.R. y Menéndez, A.N., 1997. Modelo hidrodinámico del Río Paraná desde Yacyretá hasta la ciudad de Paraná, Informe LHA-01-165-97, Ezeiza.
- Jaime, P. R, Menéndez, A. N., Uriburu Quirno, 2000, "Modelo hidrodinámico del Río Paraná para pronóstico hidrológico", XVIII Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2000, Termas de Río Hondo.
- Menéndez, A.N., Funai, R., Beirak, E., Carreras, P.E., 1987. Ezeiza IV: Un sistema computacional para el cálculo de la traslación de ondas en ríos y canales, Informe LHA-INCYTH 67-001-87. Ezeiza.
- Menéndez, A.N., 1996, Ezeiza IV: un programa computacional para redes de canales, V Congreso Argentino de mecánica Computacional, MECOM'96, San Miguel de Tucumán.
- Pujol, A., Dolinkue, A.M., 1974. Modelo hidrodinámico EZEIZA III para simulación de traslación de crecidas en ríos, Informe LHA-INCYTH 14-001-74.

ANEXO I

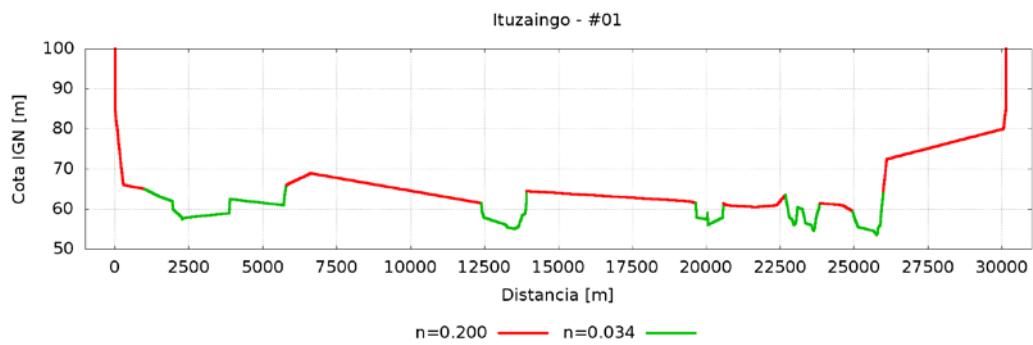


Figura A.1. Sección #01 - ITUZAINGO

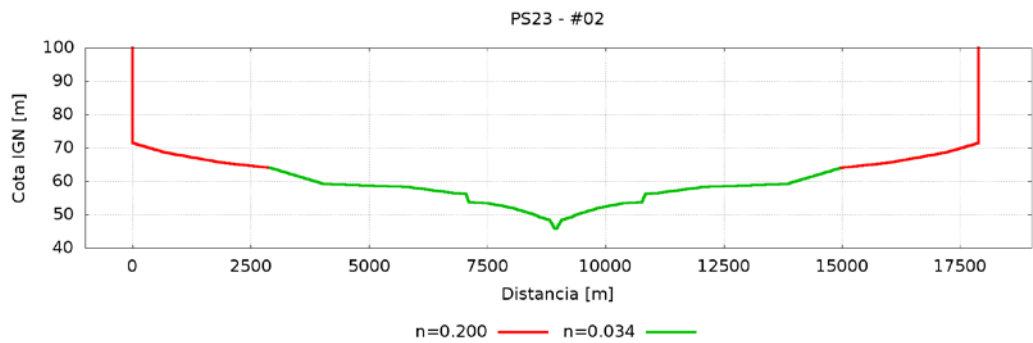


Figura A.2. Sección #02-PS23

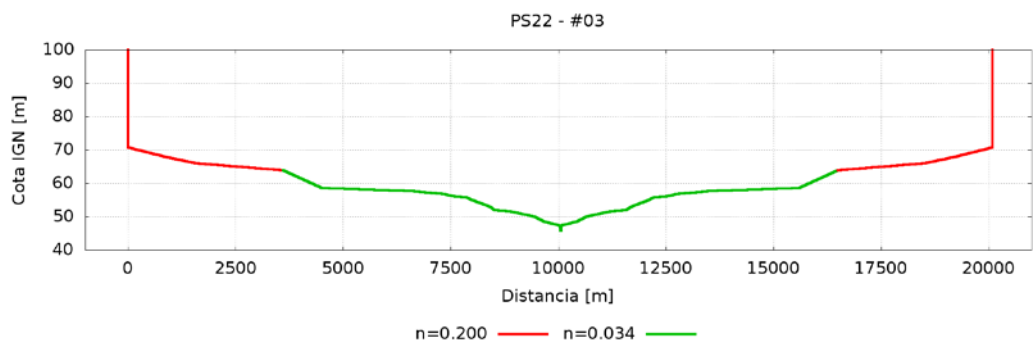


Figura A.3. Sección #03-PS22

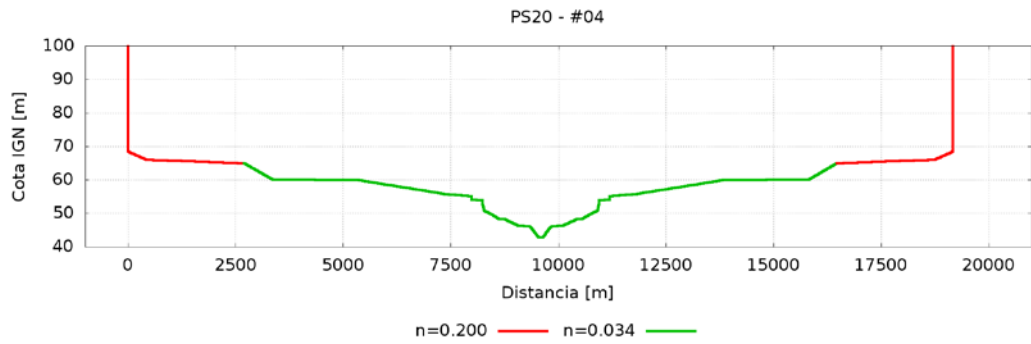


Figura A.4. Sección #04-PS20

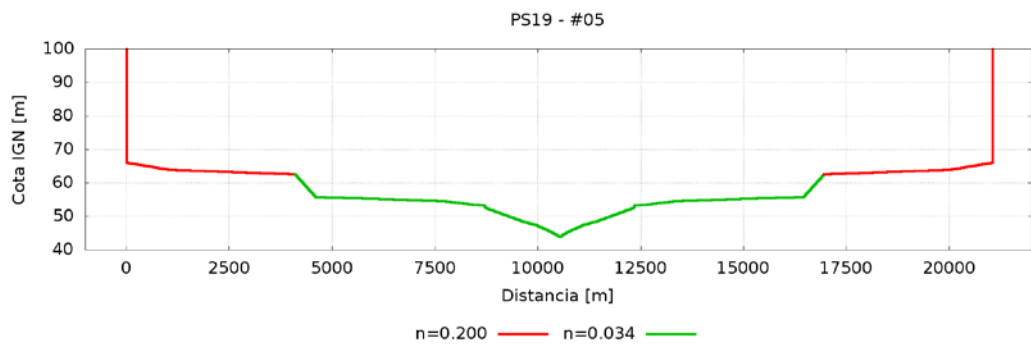


Figura A.5. Sección #05-PS19

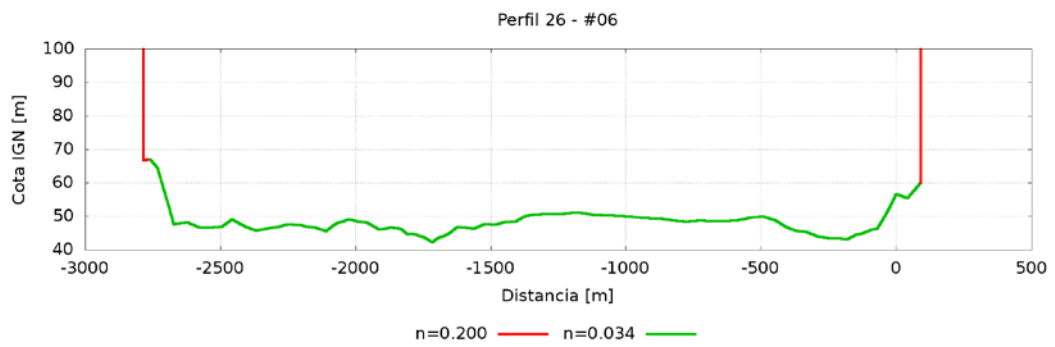


Figura A.6. Sección #06-PERFIL 26

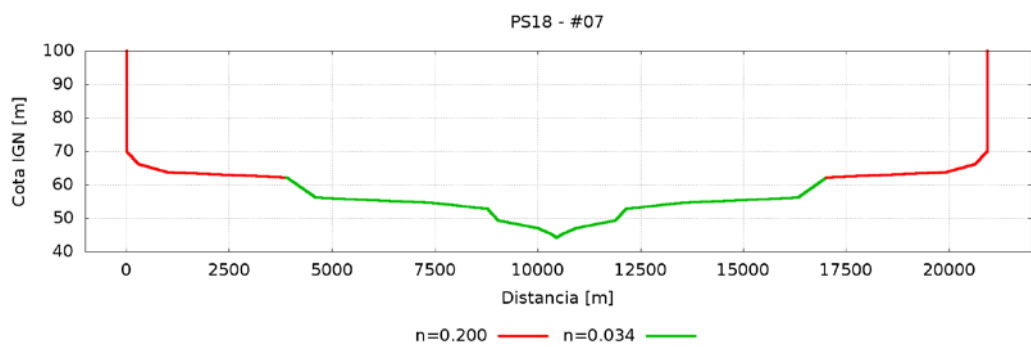


Figura A.7. Sección #07-PS18

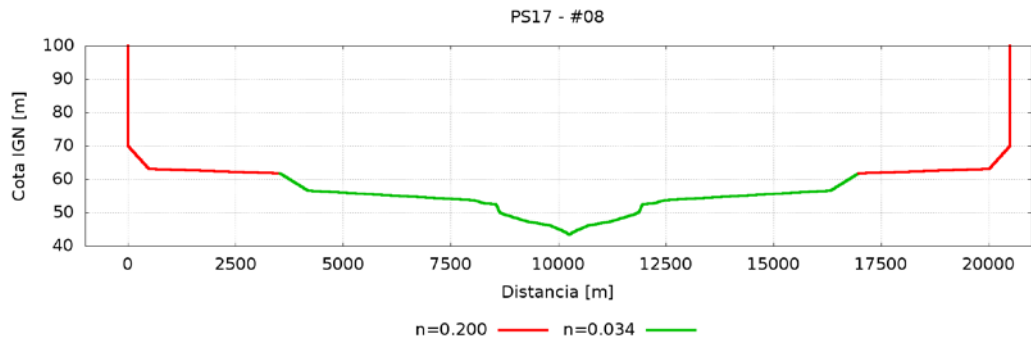


Figura A.8. Sección #08-PS17

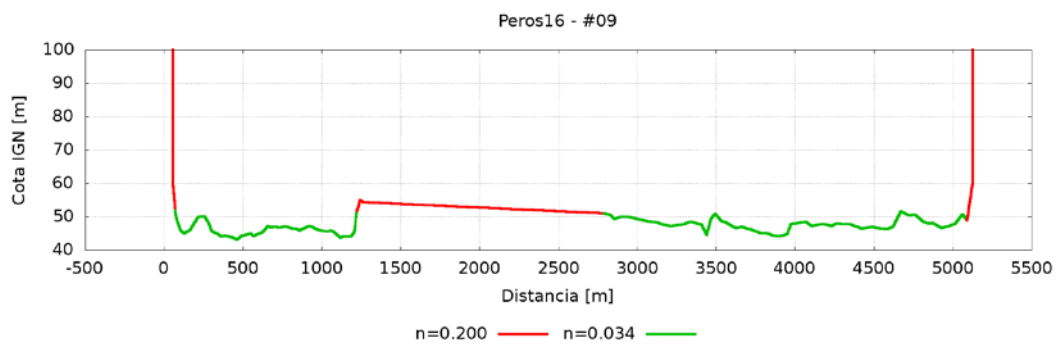


Figura A.9. Sección #09-PEROS16

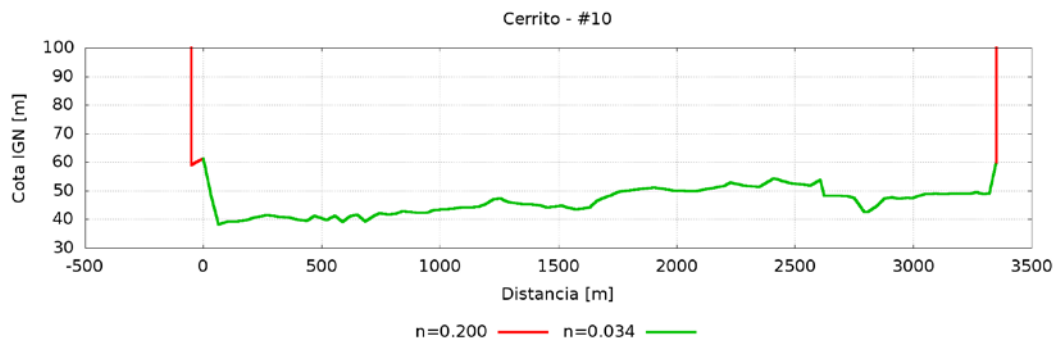


Figura A.10. Sección #10-CERRITO

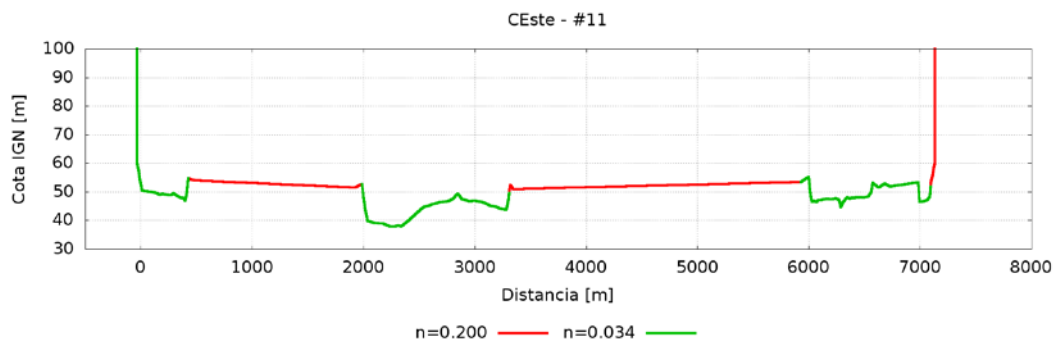


Figura A.11. Sección #11-CESTE

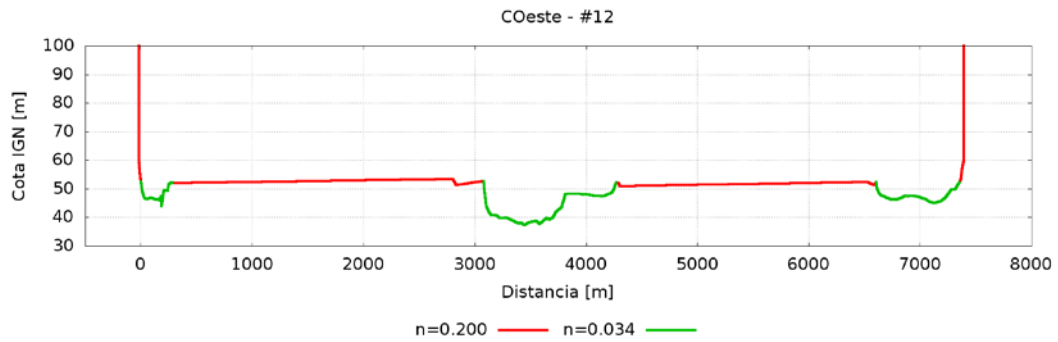


Figura A.12. Sección #12-COESTE

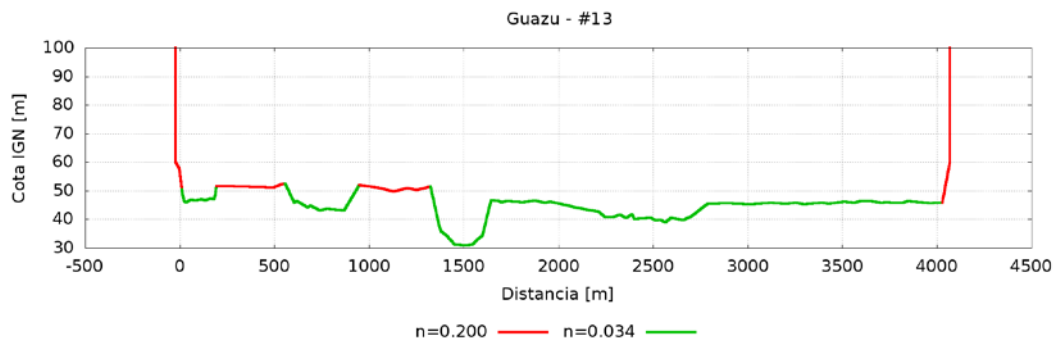


Figura A.13. Sección #13-GUAZU

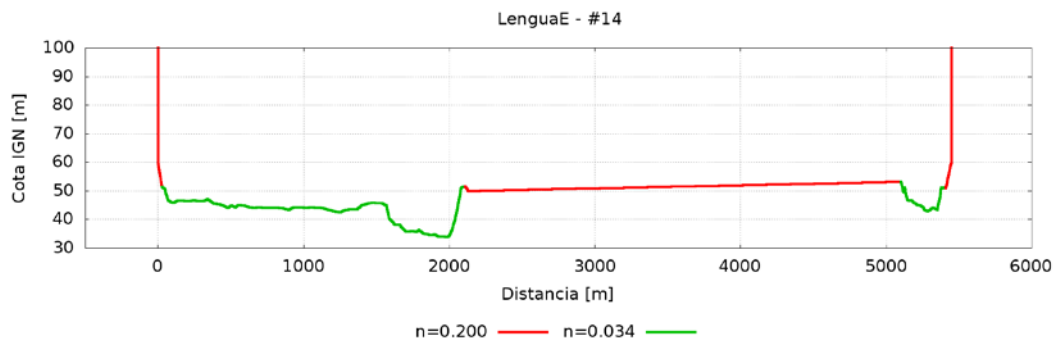


Figura A.14. Sección #14-LENGUA E

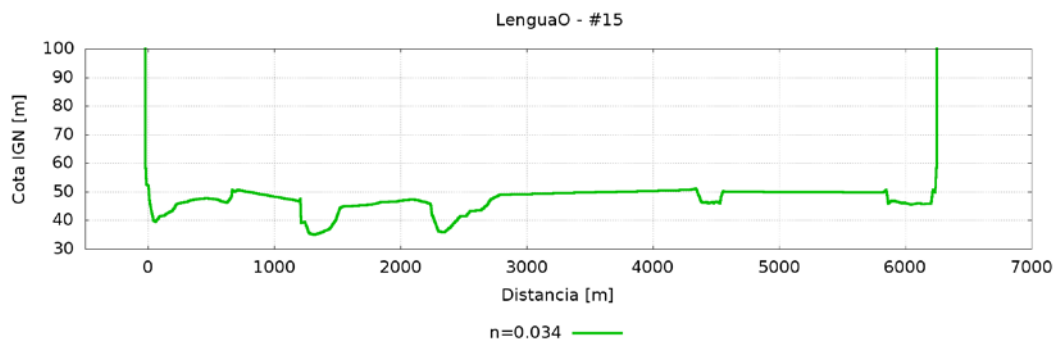


Figura A.15. Sección #15-LENGUA O

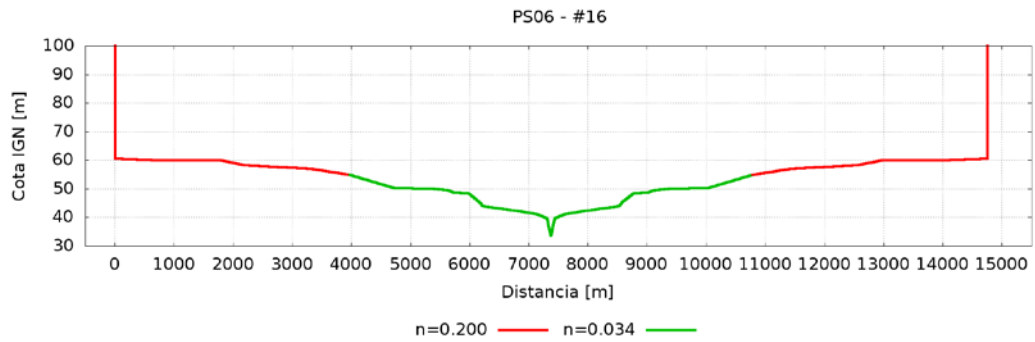


Figura A.16. Sección #16-PS06

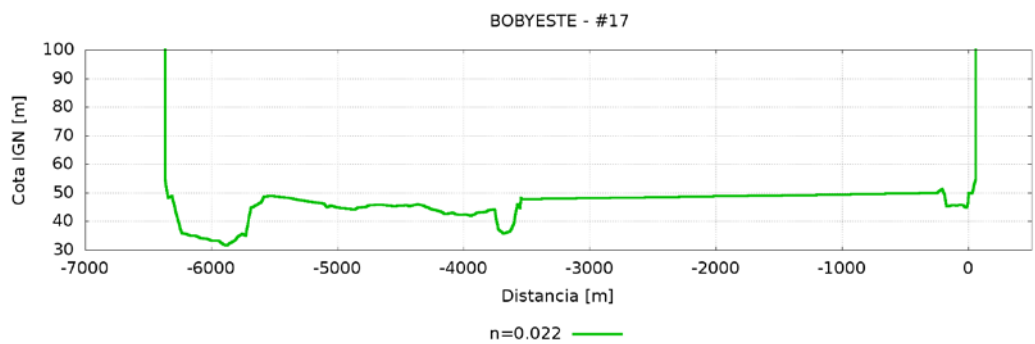


Figura A.17. Sección #17-BOBYESTE

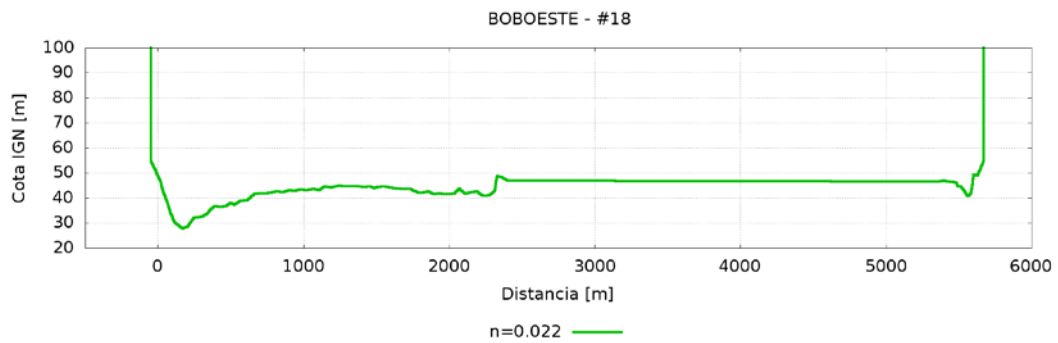


Figura A.18. Sección #18-BOBOESTE

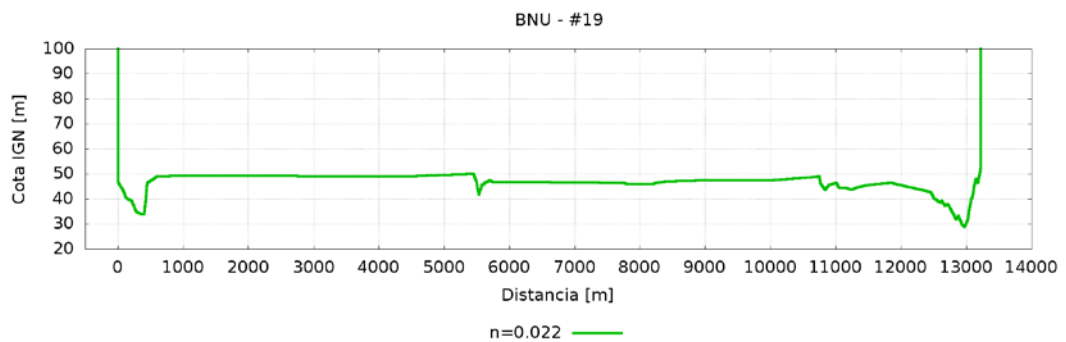


Figura A.19. Sección #19-BNU

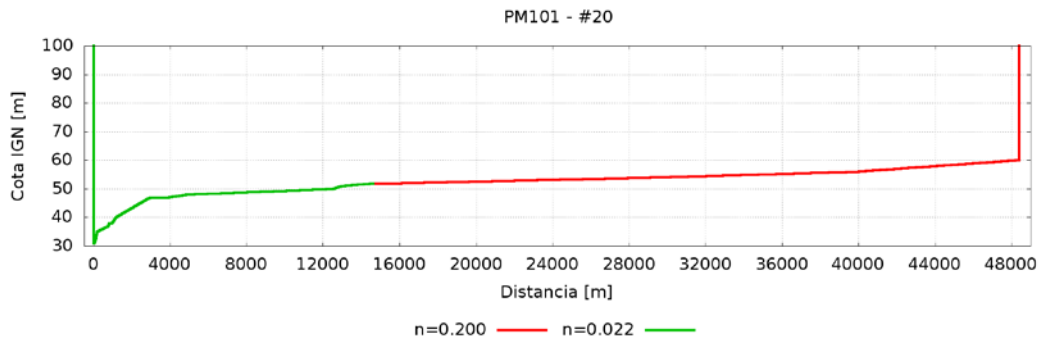


Figura A.20. Sección #20-PM101

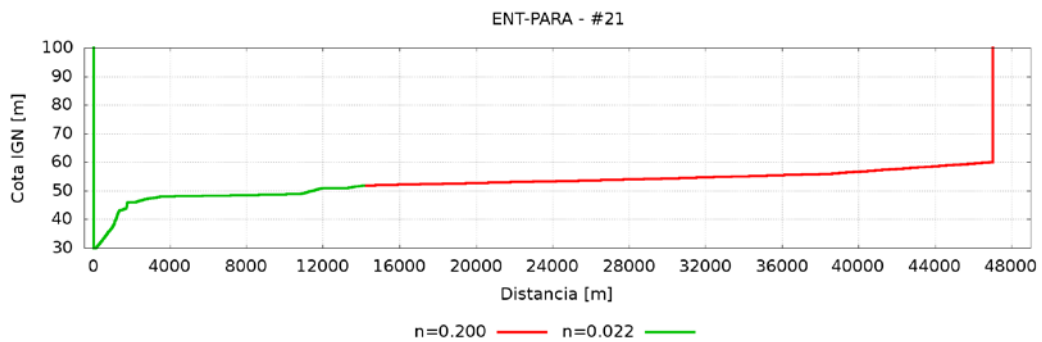


Figura A.21. Sección #21-ENT-PARA

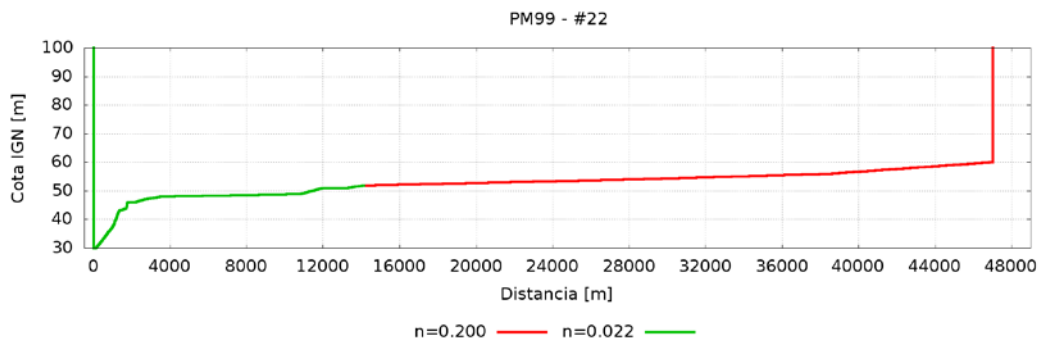


Figura A.22. Sección #22-PM99

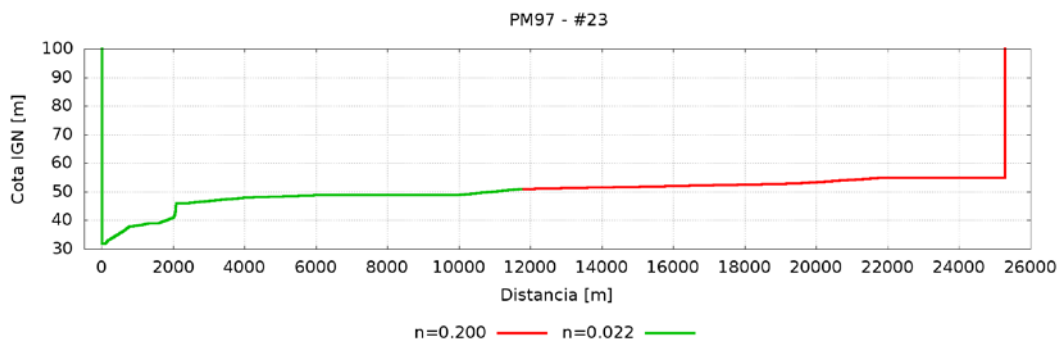


Figura A.23. Sección #23-PM97

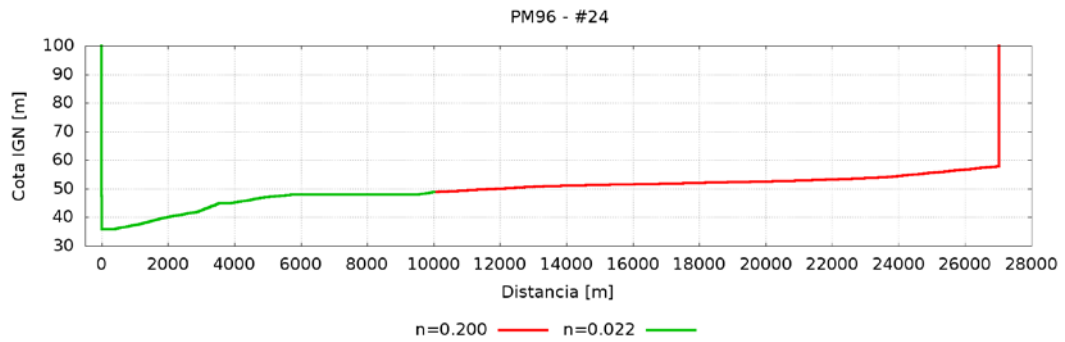


Figura A.24. Sección #24-PM96

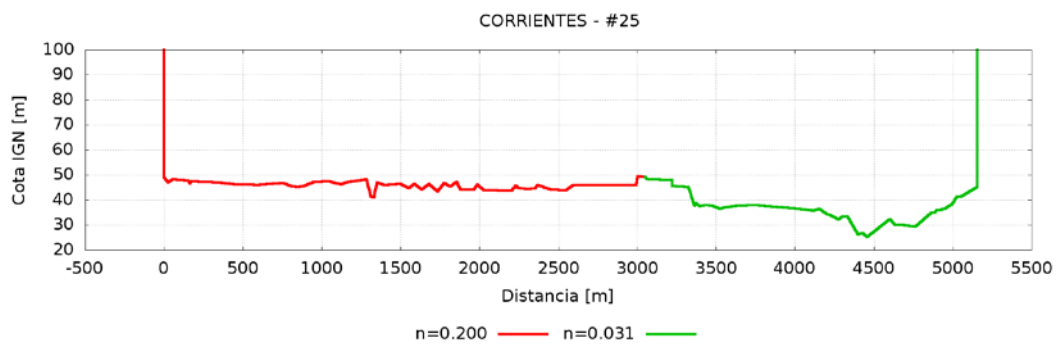


Figura A.25. Sección #25-CORRIENTES

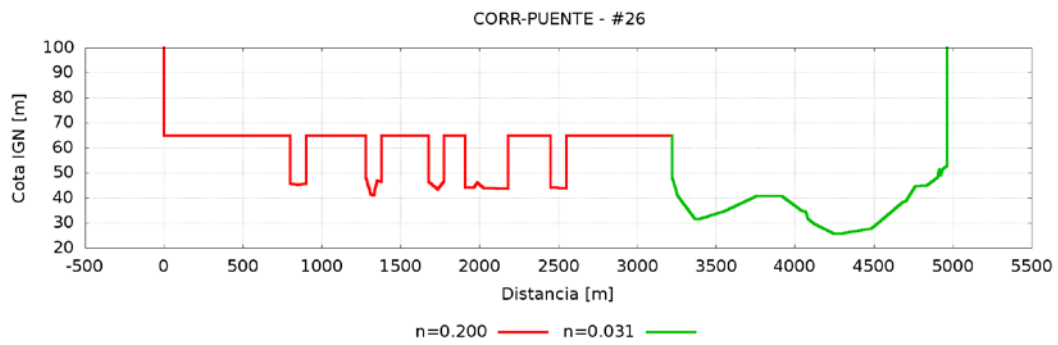


Figura A.26. Sección #26-CORR-PUENTE

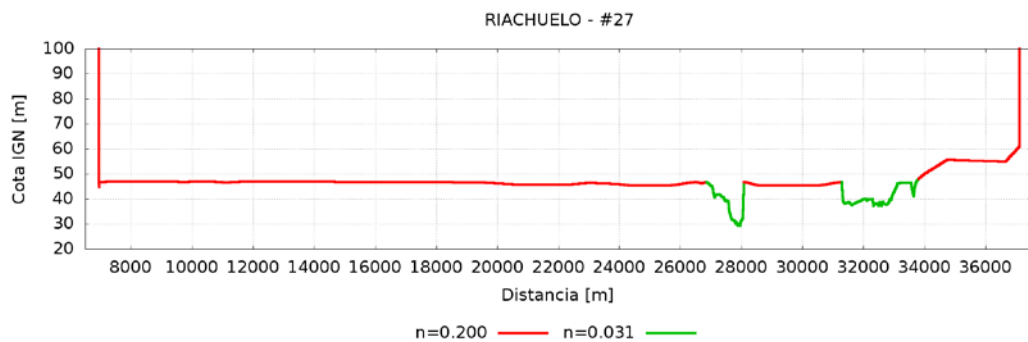


Figura A.27. Sección #27-RIACHUELO

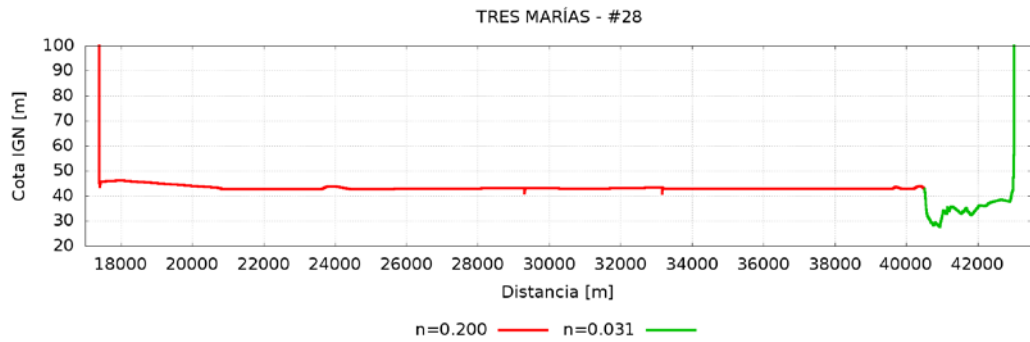


Figura A.28. Sección #28–TRES MARIAS

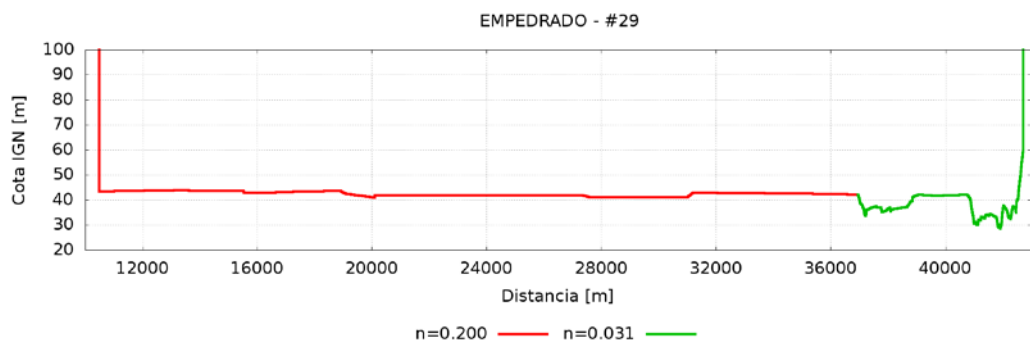


Figura A.29. Sección #29–EMPEDRADO

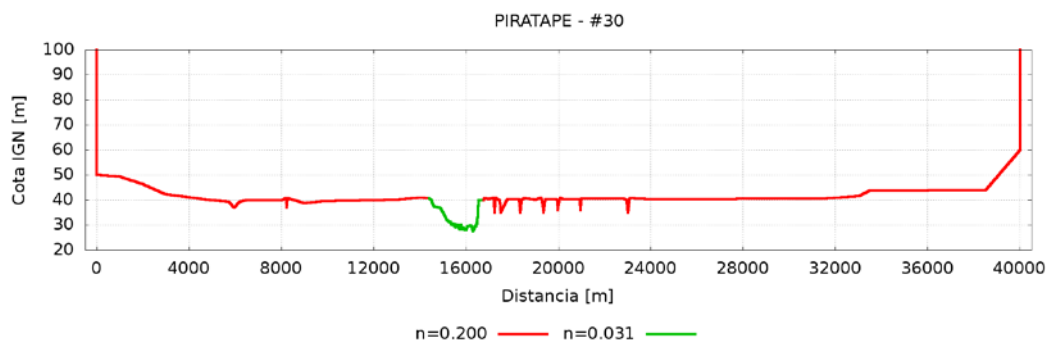


Figura A.30. Sección #30–PIRATAPE

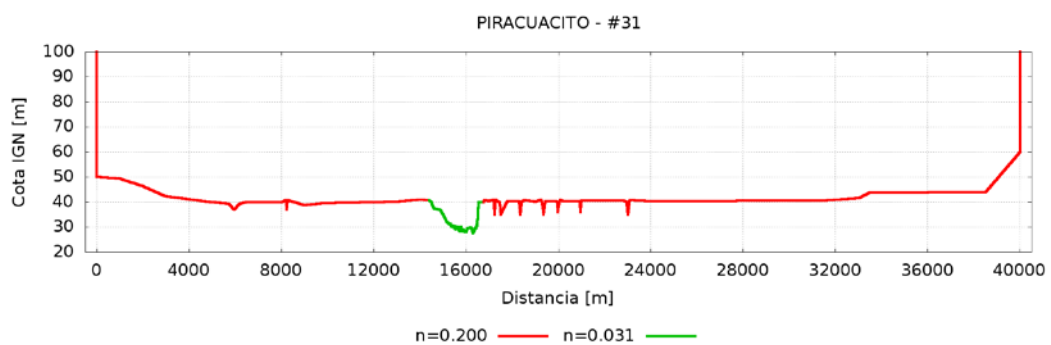


Figura A.31. Sección #31 –PIRACUACITO

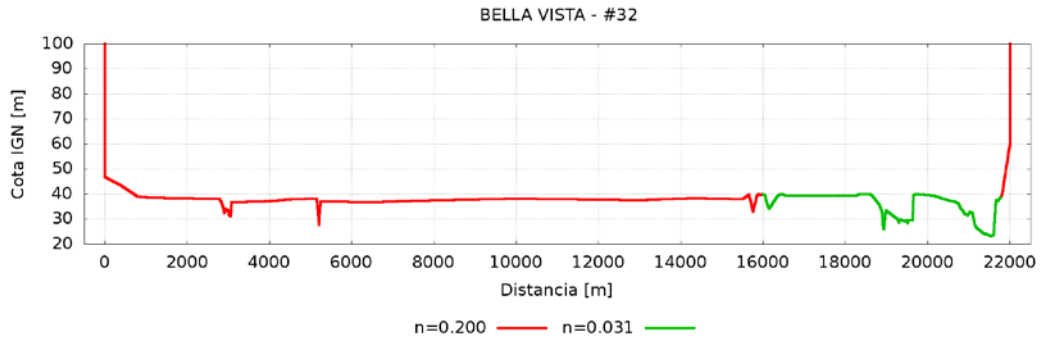


Figura A.32. Sección #32-BELLA VISTA

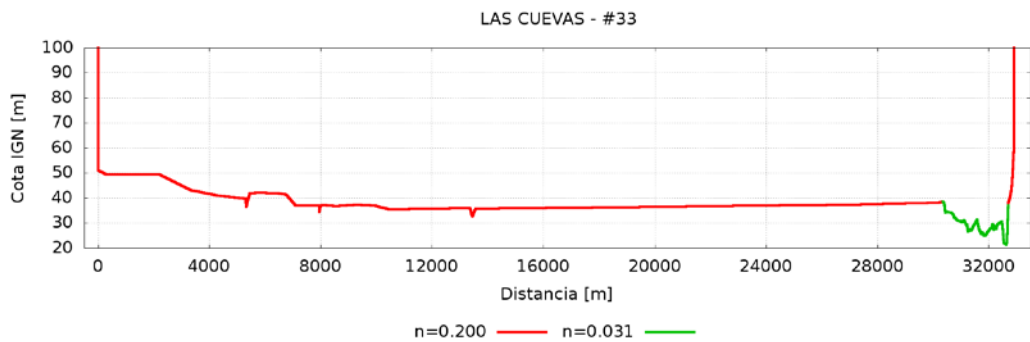


Figura A.33. Sección #33-LAS CUEVAS

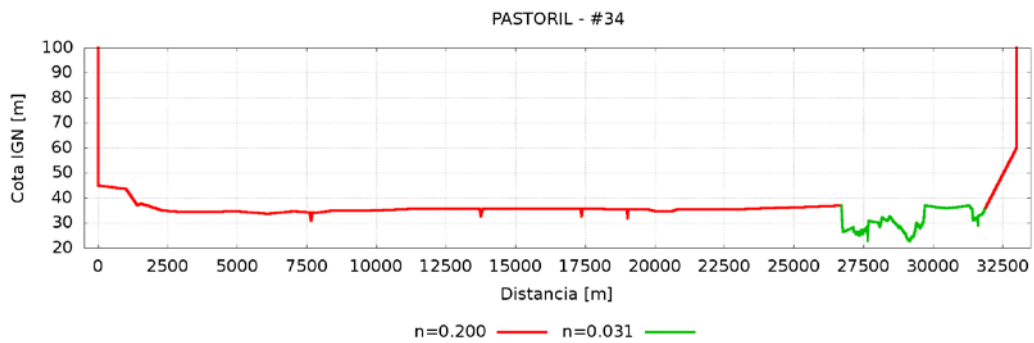


Figura A.34. Sección #34-PASTORIL

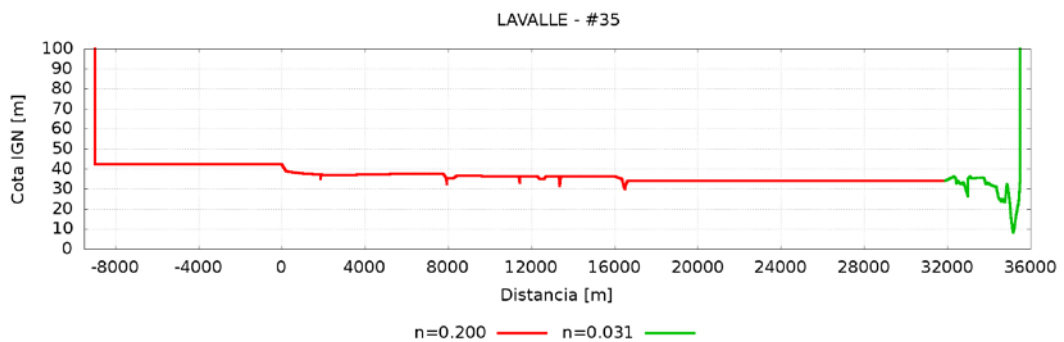


Figura A.35. Sección #35-LAVALLE

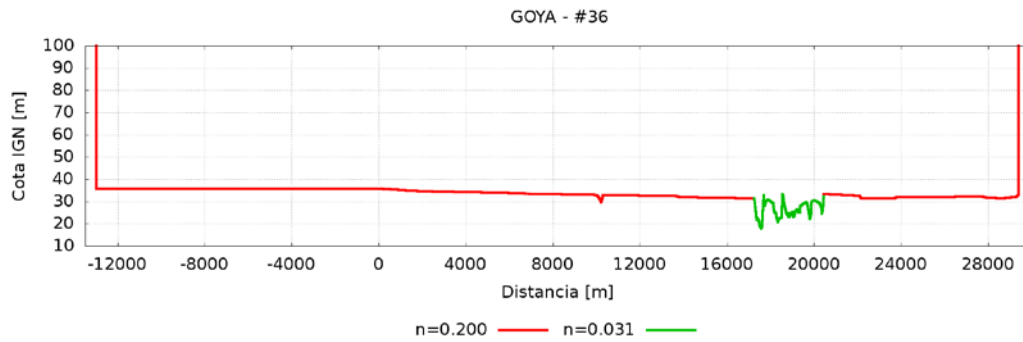


Figura A.36. Sección #36–GOYA

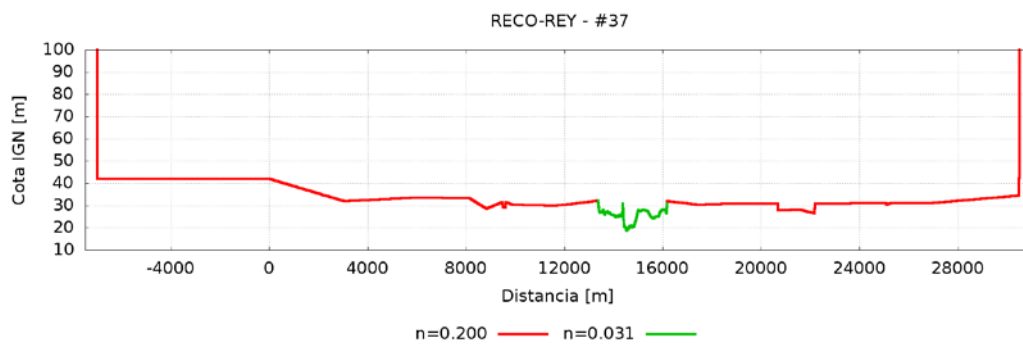


Figura A.37. Sección #37–RECO-REY



Figura A.38. Sección #38–RECONQUISTA

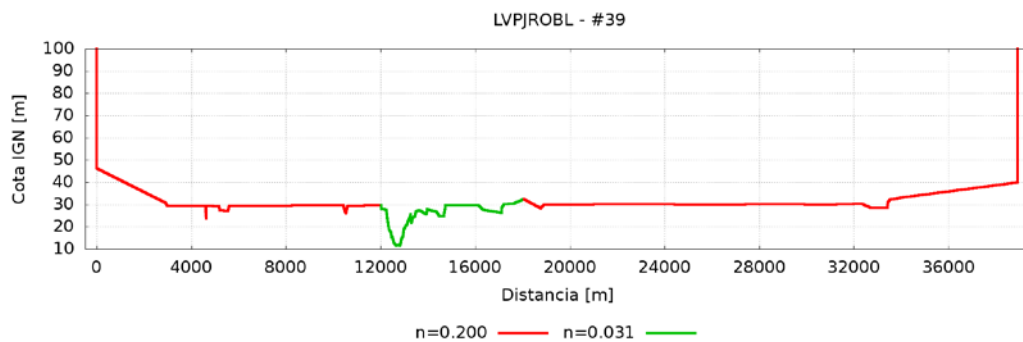


Figura A.39. Sección #39–LVPJROBL

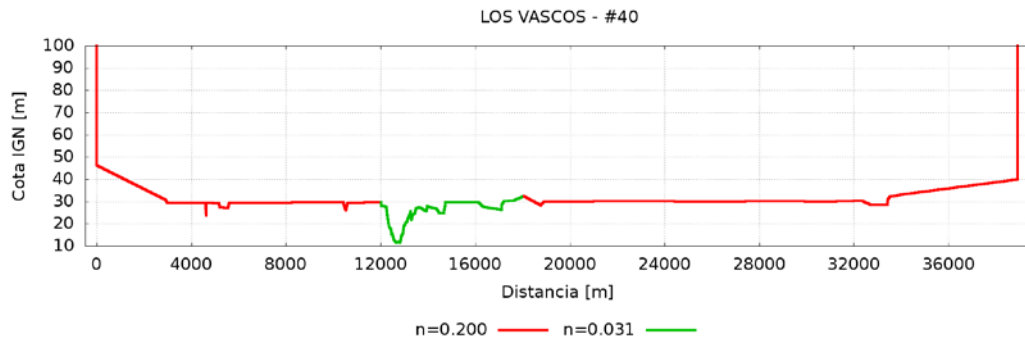


Figura A.40. Sección #40-LOS VASCOS

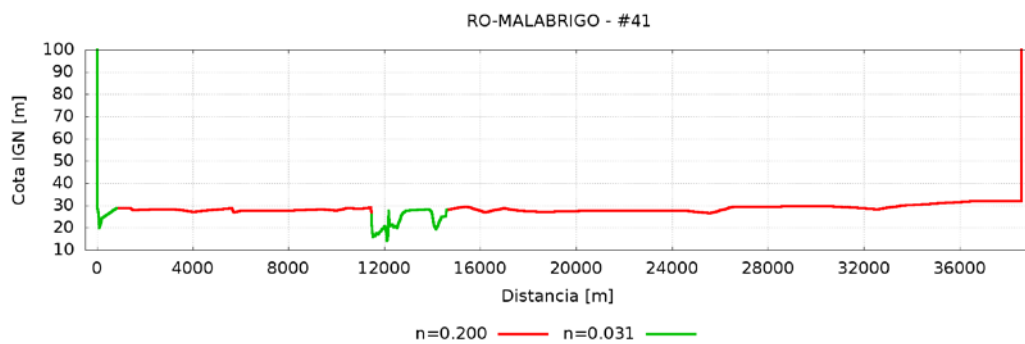


Figura A.41. Sección #41 -RO-MALABRIGO

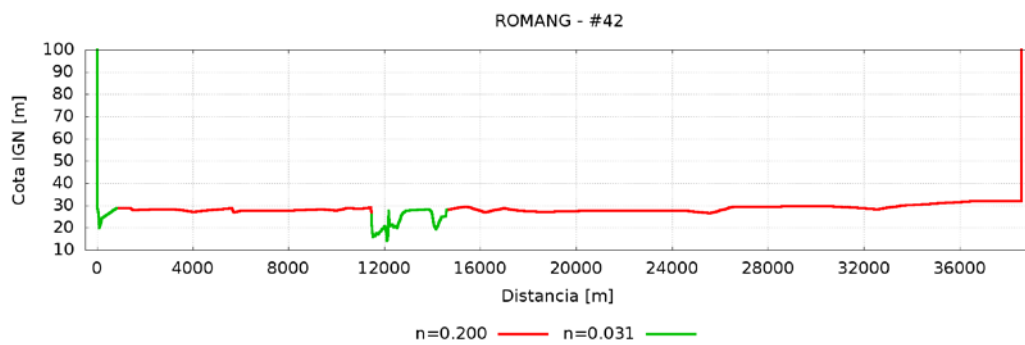


Figura A.42. Sección #42-ROMANG

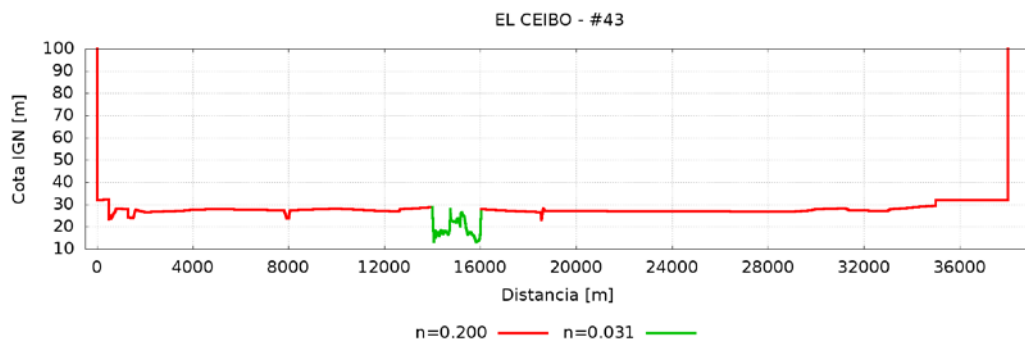


Figura A.43. Sección #43-EL CEIBO

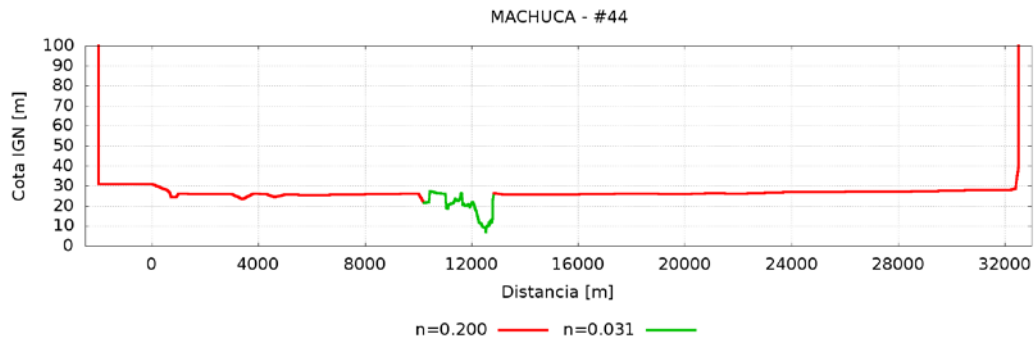


Figura A.44. Sección #44-MACHUCA

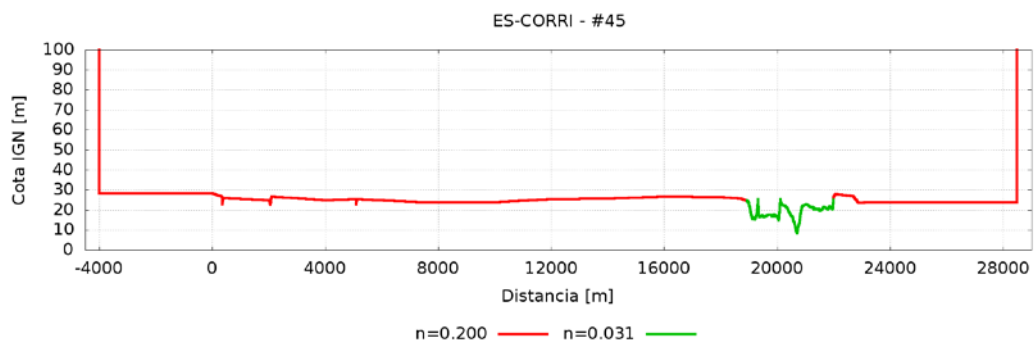


Figura A.45. Sección #45-ES-CORRI

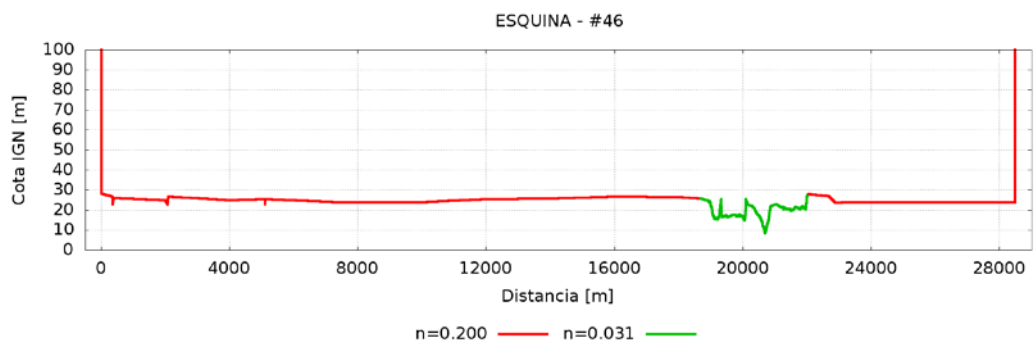


Figura A.46. Sección #46-ESQUINA

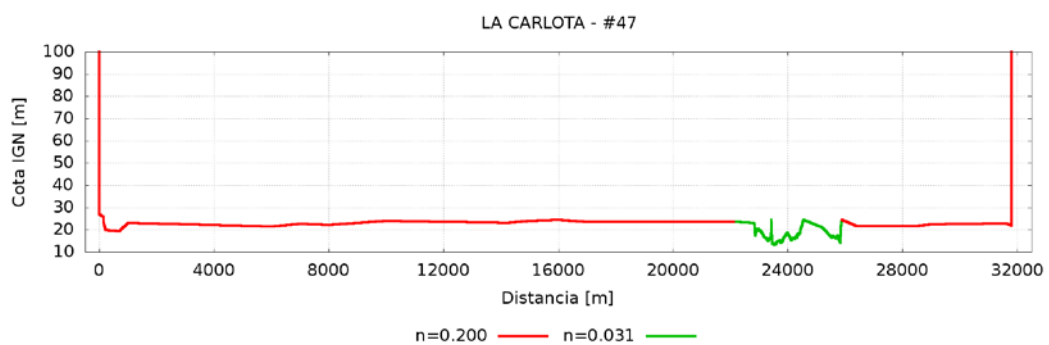


Figura A.47. Sección #47-LA CARLOTA

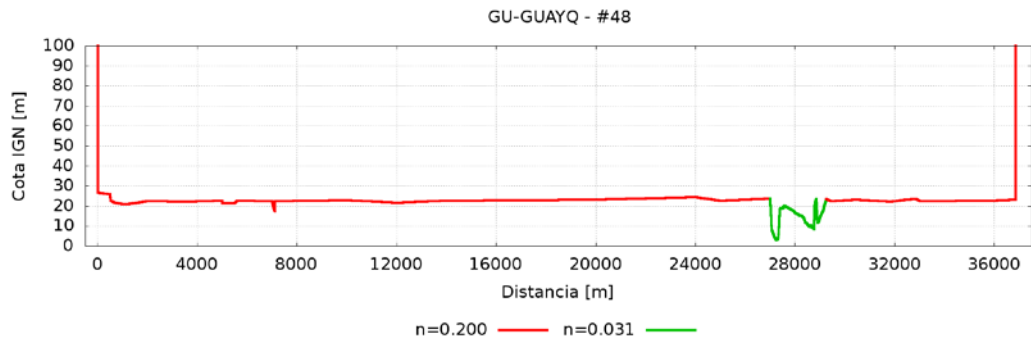


Figura A.48. Sección #48–GU-GUAYQ

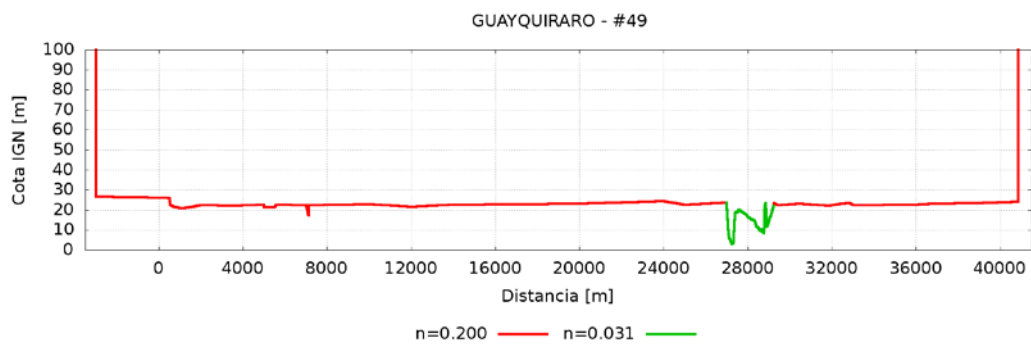


Figura A.49. Sección #49–GUAYQUIRRO

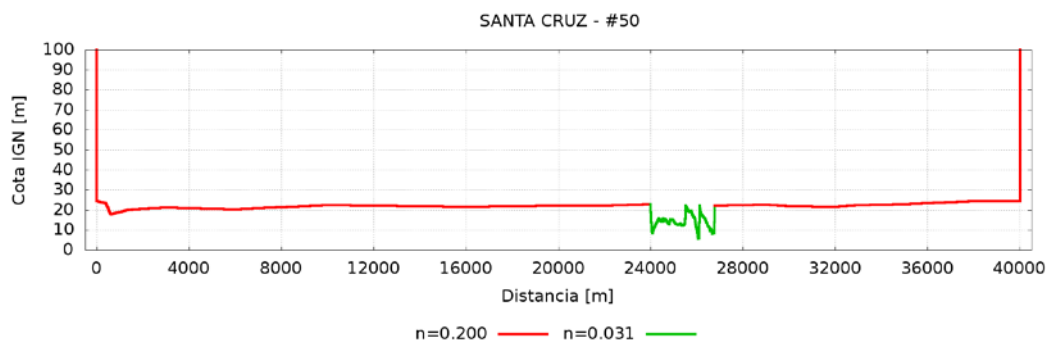


Figura A.50. Sección #50–SANTA CRUZ

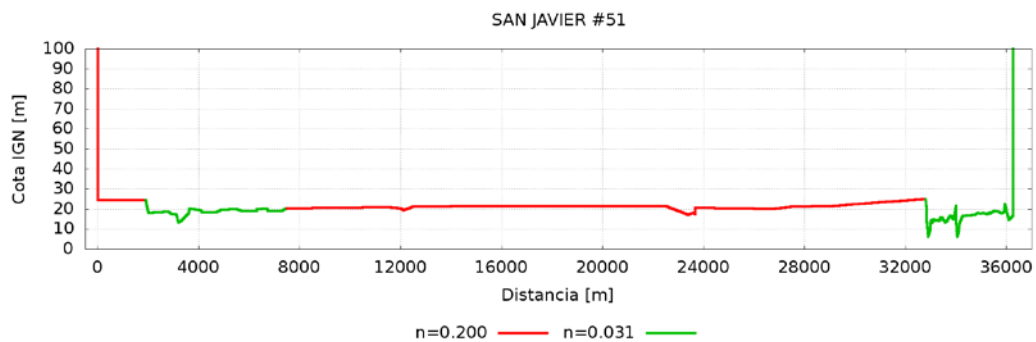


Figura A.51. Sección #51 –SAN JAVIER

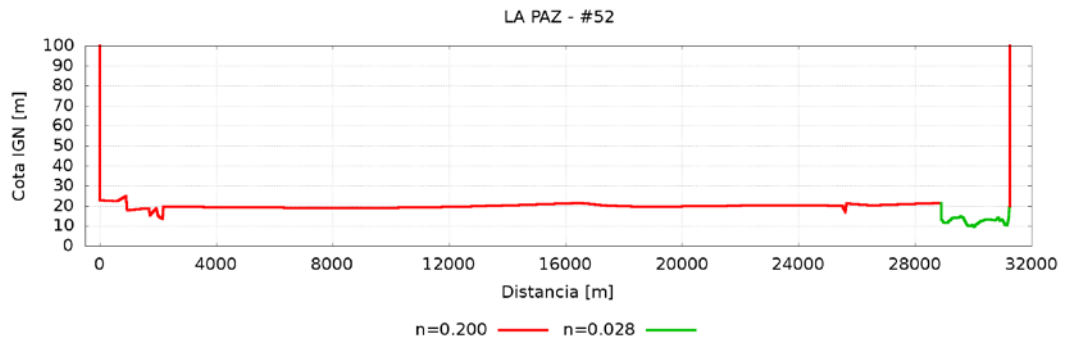


Figura A.52. Sección #52-LA PAZ

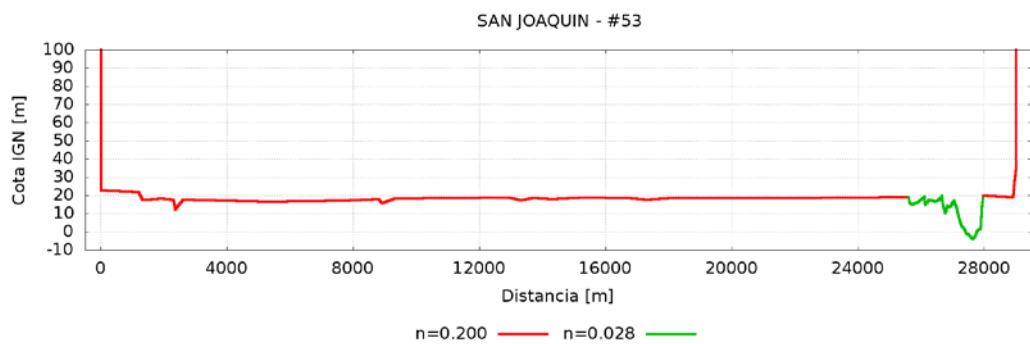


Figura A.53. Sección #53-SAN JOAQUIN

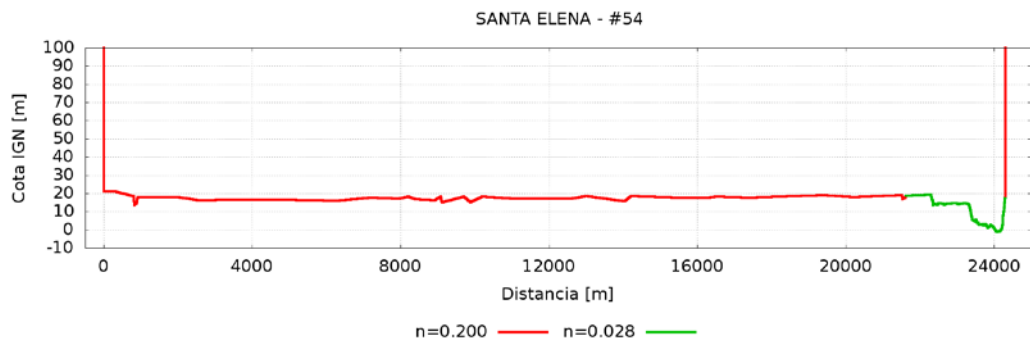


Figura A.54. Sección #54-SANTA ELENA

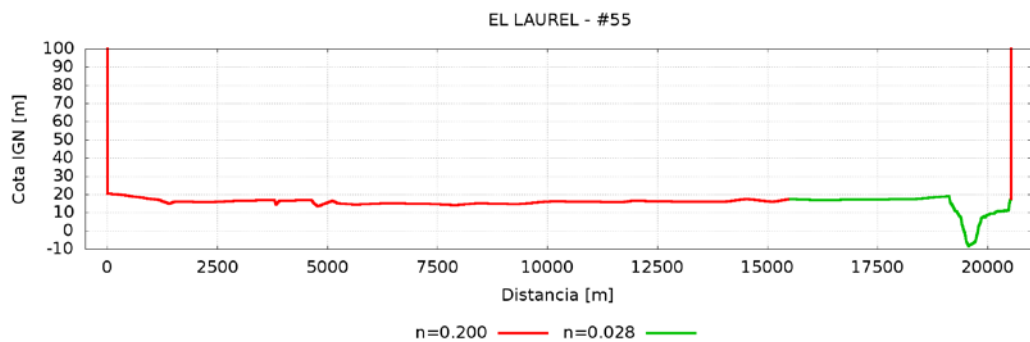


Figura A.55. Sección #55-EL LAUREL

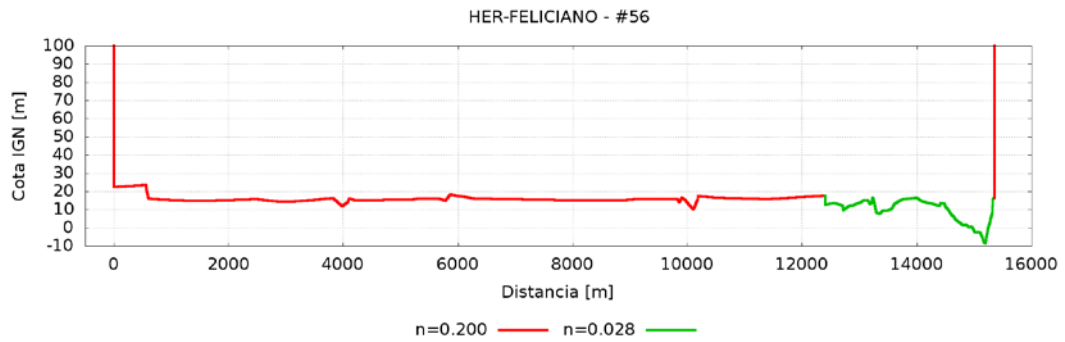


Figura A.56. Sección #56-HER-FELICIANO

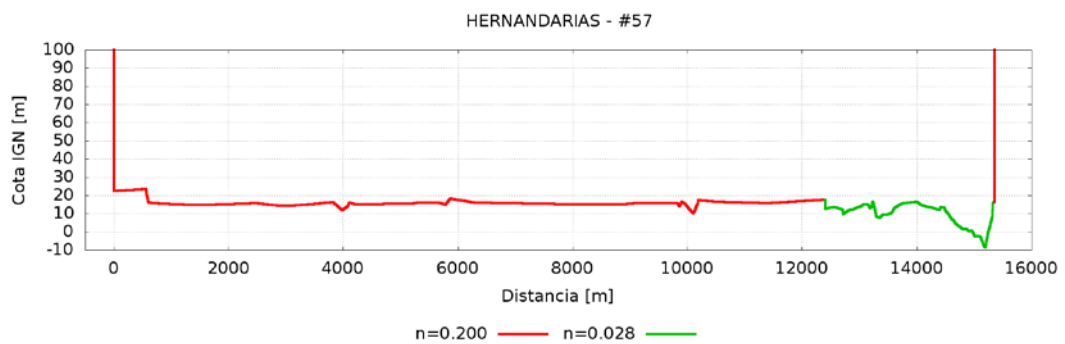


Figura A.57. Sección #57-HERNANDARIAS

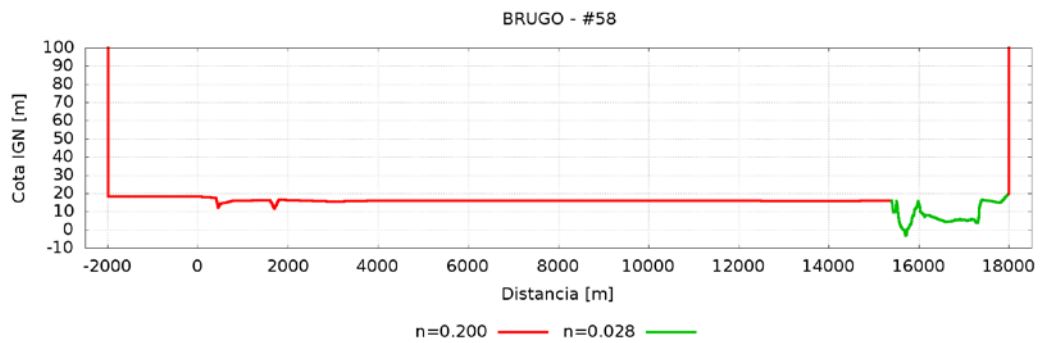


Figura A.58. Sección #58-BRUGO

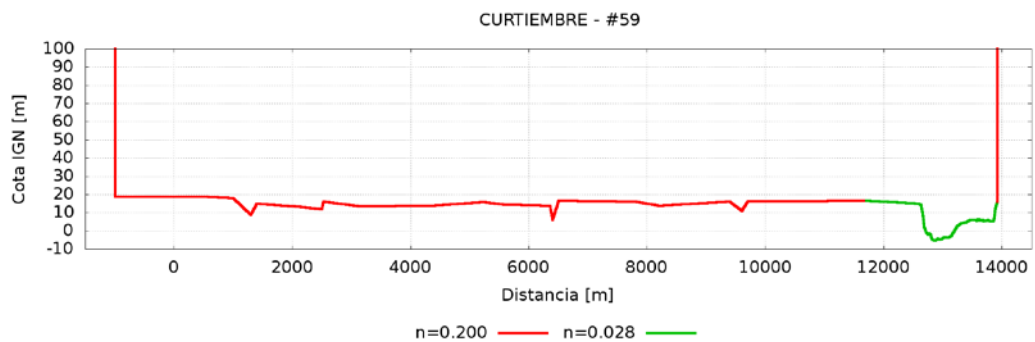


Figura A.59. Sección #59-CURTIEMBRE

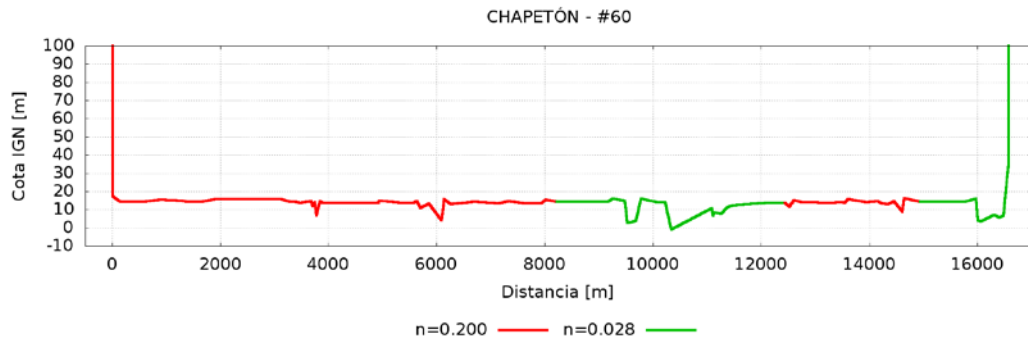


Figura A.60. Sección #60–CHAPETON

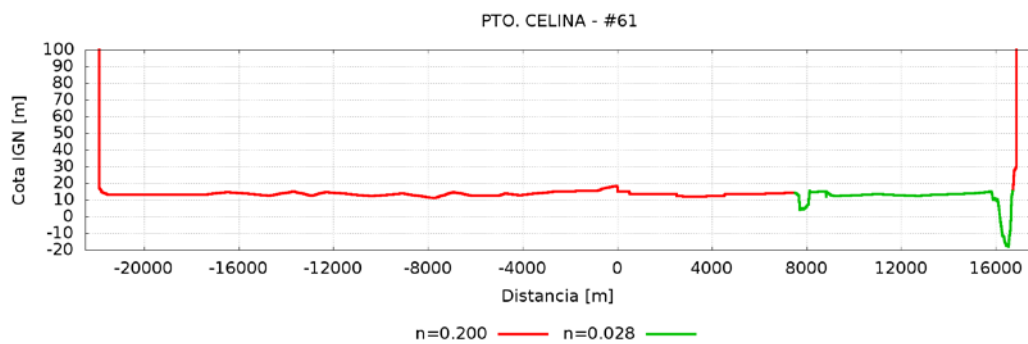


Figura A.61. Sección #61 –PTO. CELINA

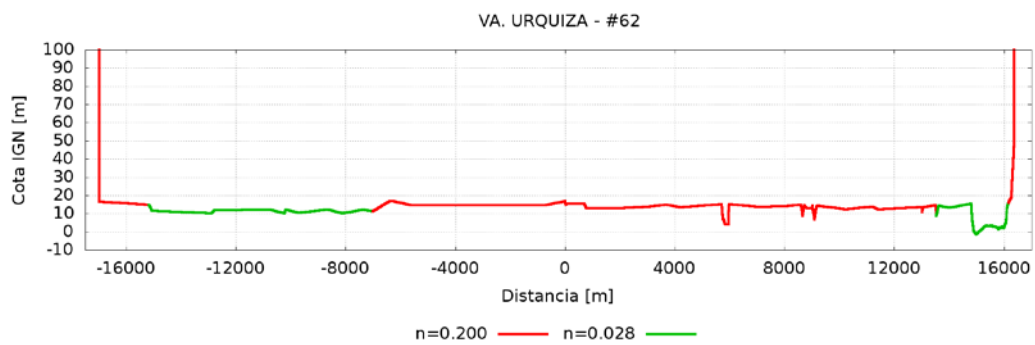


Figura A.62. Sección #62–VA. URQUIZA

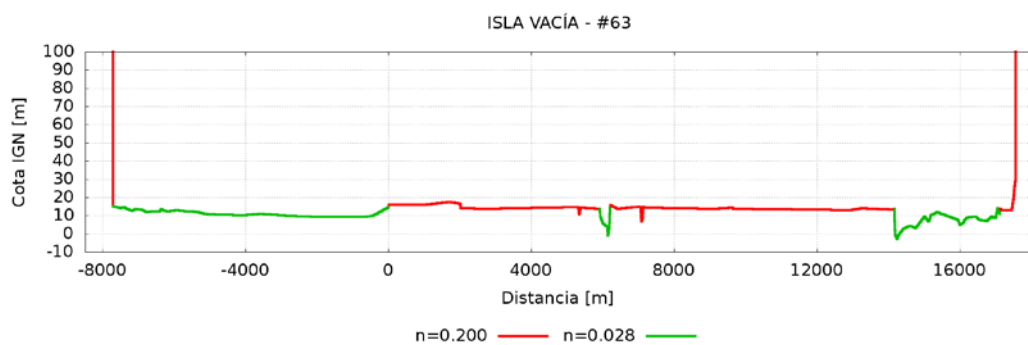


Figura A.63. Sección #63–ISLA VACIA

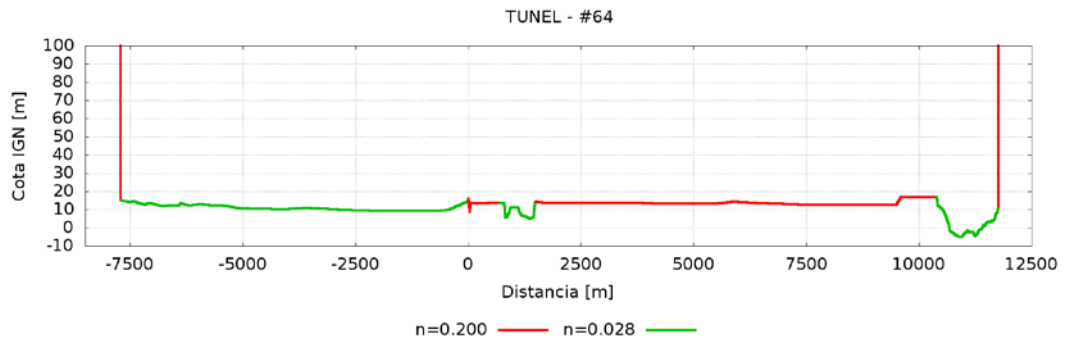


Figura A.64. Sección #64-TUNEL

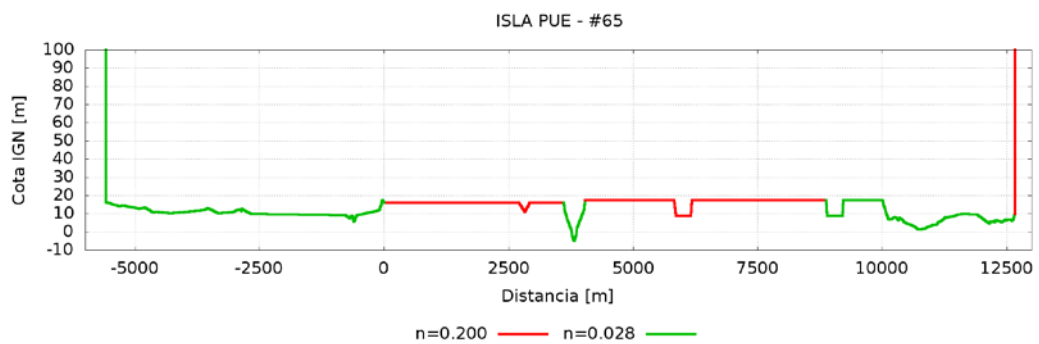


Figura A.65. Sección #65-ISLA PUE

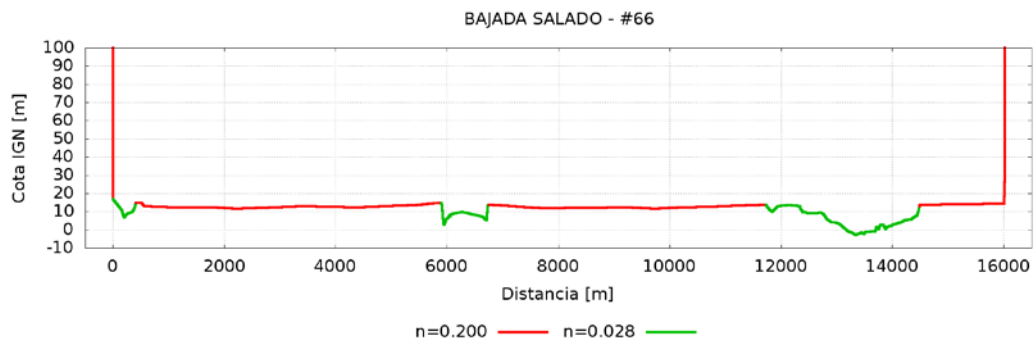


Figura A.66. Sección #66-BAJADA SALADO

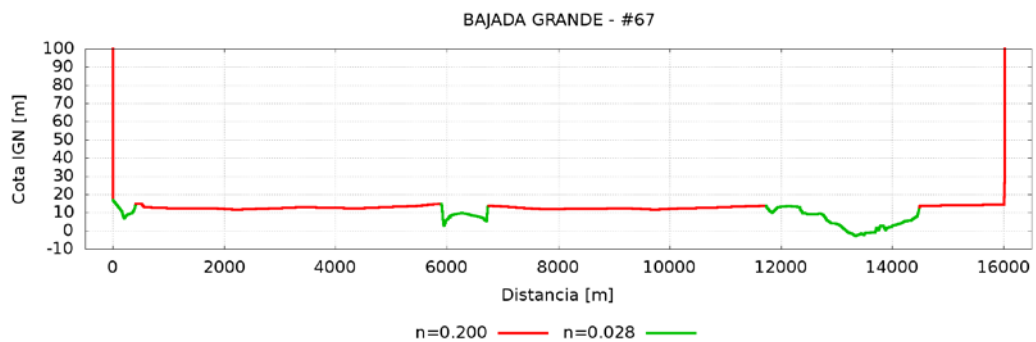


Figura A.67. Sección #67-BAJADA GRANDE

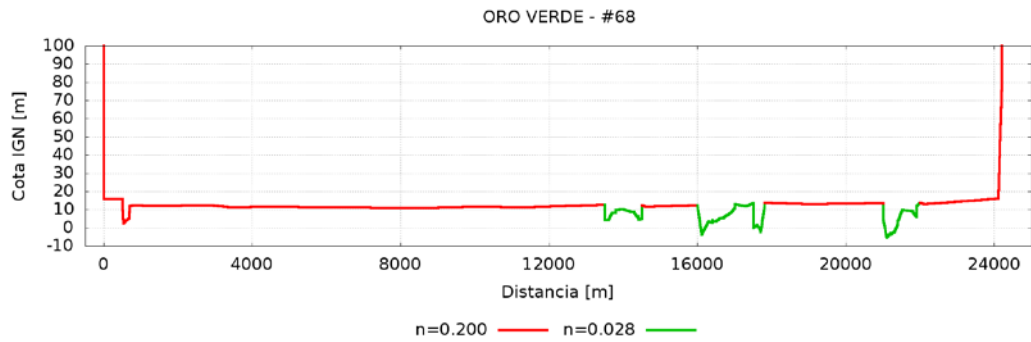


Figura A.68. Sección #68-ORO VERDE

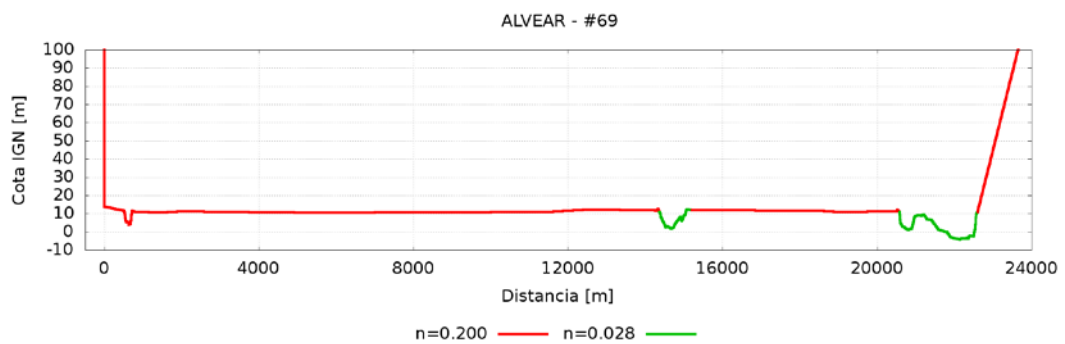


Figura A.69. Sección #69-ALVEAR

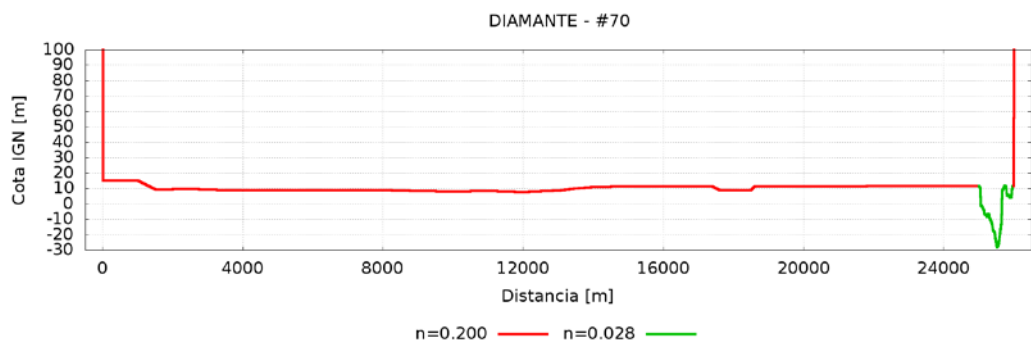


Figura A.70. Sección #70-DIAMANTE

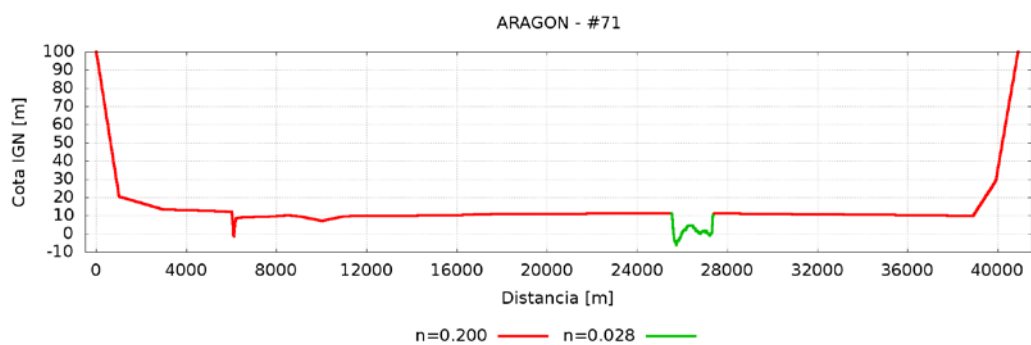


Figura A.71. Sección #71-ARAGON

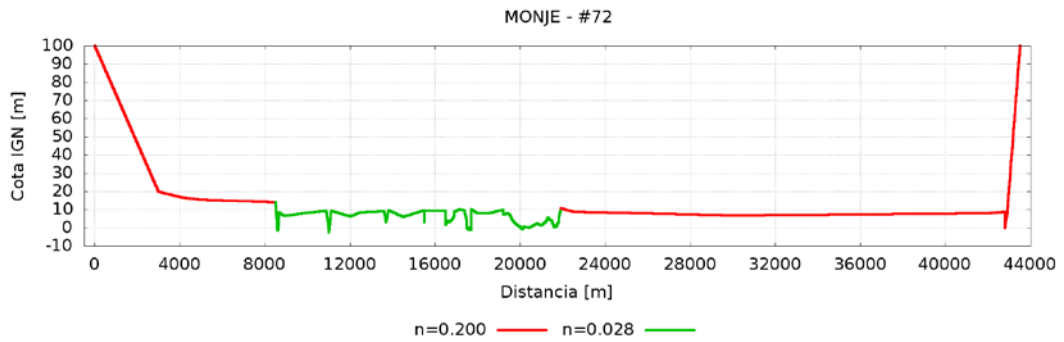


Figura A.72. Sección #72–MONJE

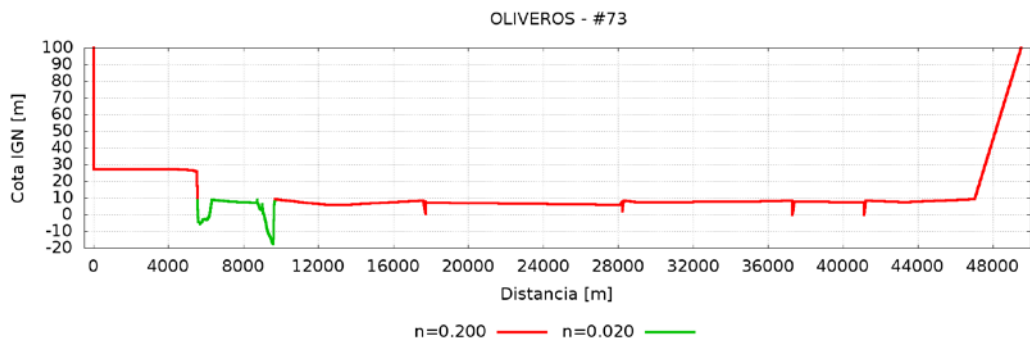


Figura A.73. Sección #73–OLIVEROS

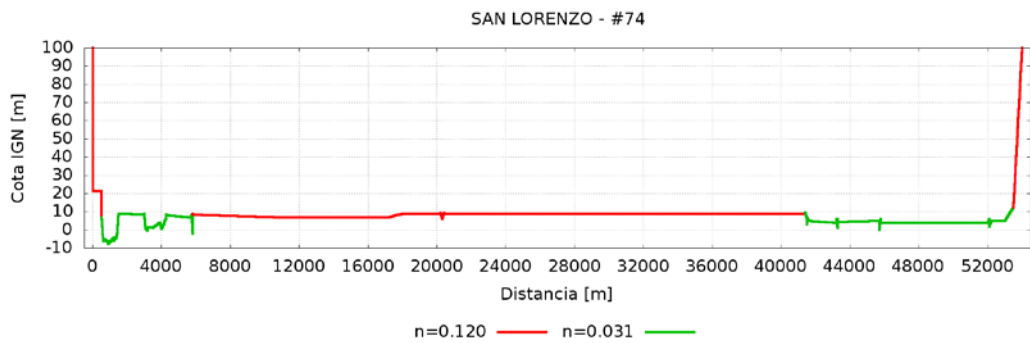


Figura A.74. Sección #74–SAN LORENZO

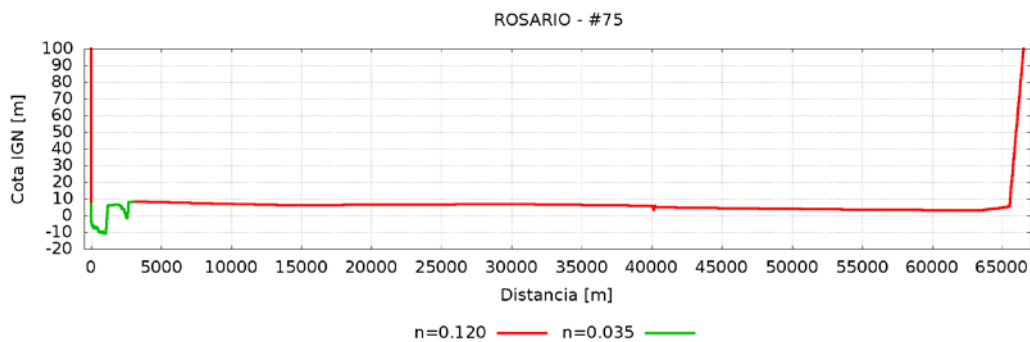


Figura A.75. Sección #75–ROSARIO

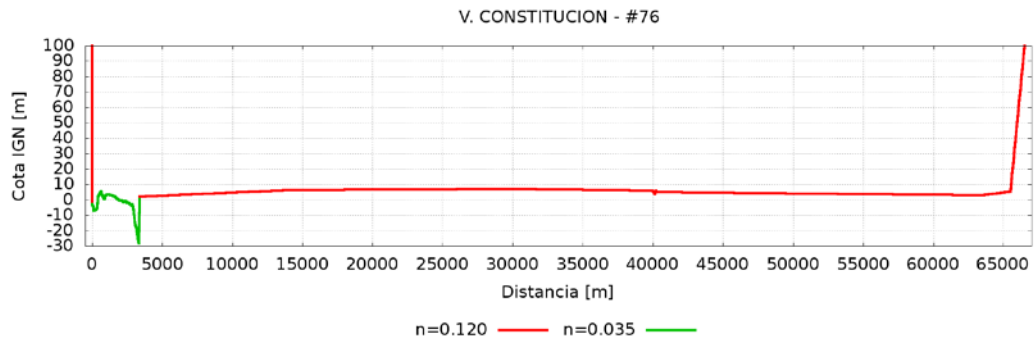


Figura A.76. Sección #76–V. CONSTITUCION