



TECNOCONSULTA
INGENIEROS CONSULTORES

AUTOPISTAS DEL SOL S.A

**ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA DOBLE CALZADA DE LA VARIANTE DE
PALMAR DE VARELA INCLUYENDO EL DISEÑO DE CINCO (5)
INTERSECCIONES A NIVEL**

VOLUMEN VII

**INFORME FINAL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA
Y SOCAVACIÓN**

VERSIÓN 05

TC-2082-135



AUTOPISTAS DEL SOL

INFORME FINAL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN

VERSIÓN 05

CONTROL DE MODIFICACIONES

Versión N°	Fecha	Descripción de la Modificación	Elaboró
01	Diciembre 15 de 2010	Emisión Original	Ing. Antonio María Blanco
02	Noviembre 18 de 2011	Ajustes por observaciones y cambios de cotas Arroyo Caña Fístula	Ing. Antonio María Blanco
03	Febrero 12 de 2013	Ajustes por cambios de datos topográficos y cambio de formato	Ing. Antonio María Blanco
04	Abril 16 de 2013	Modificación en Hidrología e Hidráulica del Arroyo Caña Fístula, de acuerdo a observaciones realizadas por la interventoría de fecha 05 de abril de 2013	Ing. Antonio María Blanco
05	Agosto 13 de 2013	Revisión General y Modificación en Hidrología e Hidráulica del Arroyo Caño Boye y Fístula	Ing. Paola Castro

Revisó:	Aprobó:	Verificó:
Ing. Luis Carlos Sarralde Jefe de Proyectos	Ing. José Domingo Yances Director de Proyectos	Andrés Cárdenas Villamil Representante Legal

**AUTOPISTAS DEL SOL
TECNOCONSULTA S.A.S**

**ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA DOBLE CALZADA DE LA VARIANTE DE PALMAR DE
VARELA, INCLUYENDO EL DISEÑO DE CINCO (5) INTERSECCIONES A NIVEL**

INDICE

I.	GENERALIDADES	I-1
I.1	Introducción.....	I-1
I.2	Antecedentes.....	I-1
I.3	Localización del Proyecto	I-2
II.	OBJETIVOS	II-1
II.1	Objetivo General.....	II-1
II.2	Objetivos Específicos	II-1
III.	ALCANCE Y METODOLOGÍA.....	III-1
III.1	Alcance de los estudios	III-1
III.2	Metodología General	III-1
IV.	ESTUDIO DE HIDROLOGÍA.....	IV-1
IV.1	Recopilación y análisis de la información existente	IV-1
IV.2	Cartografía	IV-1
IV.3	Información Hidrometeorológica	IV-1
IV.3.1	Precipitación	IV-2
–	Precipitación Media.....	IV-3
–	Precipitación Máximas en 24 horas.....	IV-4
IV.3.2	Climatología	IV-9
IV.3.3	Niveles.....	IV-10
IV.4	Justificación de las fórmulas empleadas	IV-12
IV.5	Aplicación de Teorías y Métodos de Predicción	IV-12
IV.5.1	Metodología utilizada en el cálculo de las crecientes.....	IV-12
IV.5.2	Caudales de diseño para Cuencas Menores de 500 Ha	IV-12
IV.5.3	Caudales de diseño para Cuencas Mayores de 500 Ha.....	IV-18
IV.5.4	Crecientes en los Sitios de Cruce	IV-20
V.	ESTUDIO HIDRÁULICO.....	V-1

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,

Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel

Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

V.1	Metodología para el desarrollo del estudio hidráulico	V-1
V.2	Geomorfología hidráulica fluvial	V-1
V.3	Hidráulica de Estructuras Menores (Alcantarillas).....	V-1
V.4	Hidráulica de Estructuras Mayores.....	V-2
V.4.1	Características del cauce del Arroyo Caña Fístula	V-2
V.4.2	Hidráulica de la sección transversal	V-5
V.5	Hidráulica de Cunetas	V-8
V.6	Hidráulica para rápidas escalonadas	V-9
V.7	Subdrenes.....	V-9
VI.	ESTUDIO DE SOCAVACIÓN.....	VI-1
VI.1	Aplicación de las teorías de socavación general	VI-1
VI.2	Aplicación de las teorías de socavación lateral en estribos	VI-3
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	VII-7
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	VIII-1

ANEXOS

ANEXO No.1 PLANCGAS IGAC

ANEXO No.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DEL IDEAM

ANEXO No.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO

ANEXO No.4 ÁREAS DE DRENAJE

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO IV-1. ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN	IV-2
CUADRO IV-2. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm)	IV-3
CUADRO IV-3. PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)	IV-4
CUADRO IV-4. RESUMEN DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS (mm)	IV-5
CUADRO IV-5. DATOS CLIMATOLÓGICOS DEL AEROPUERTO ERNESTO CORTIZZOS	IV-7
CUADRO IV-6. CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA POLONUEVO..	IV-8
CUADRO IV-7. CAUDALES HIDROLÓGICOS PARA CUENCAS MENORES DE 500 Ha. MÉTODO RACIONAL	IV-15
CUADRO IV-8. CAUDALES HIDROLÓGICOS PARA CUENCAS MAYORES DE 500 Ha	IV-17
CUADRO V-1. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS MENORES	V-1
CUADRO V-2. CALIBRACIÓN TEÓRICA SECCIÓN ARROYO CAÑA FISTULA	V-6
CUADRO V-3. CALIBRACIÓN TEÓRICA SECCIÓN DEL BOX ARROYO BOYE	V-7
CUADRO VI-1. CALCULO DE SOCAVACIÓN GENERAL EN LA SECCIÓN ARROYO CAÑA FISTULA	VI-3
CUADRO VI-2. CÁLCULO DE SOCAVACIÓN LATERAL EN LOS ESTRIBOS ARROYO CAÑA FISTULA 100 AÑOS	VI-4

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I-1. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA VARIANTE PALMAR DE VARELA.....	I-3
FIGURA I-2. LOCALIZACIÓN ESPECÍFICA DE LA VARIANTE PALMAR DE VARELA ..	I-3
FIGURA IV-1. PLUVIOGRAMA MEDIO MENSUAL ESTACIÓN POLONUEVO	IV-3
FIGURA IV-2. PLUVIOGRAMA MEDIO MENSUAL ESTACIÓN PONEDERA.....	IV-4
FIGURA IV-3. ESTACIÓN POLONUEVO. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS.....	IV-6
FIGURA IV-4. CURVA IDF ESTACIÓN POLONUEVO.....	IV-8
FIGURA IV-5. HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN 100 AÑOS ESTACIÓN POLONUEVO	IV-9
FIGURA V-1. NOMOGRAMA DEL MOPT PARA TUBOS CIRCULARES CON CONTROL A LA	V-4
FIGURA V-2. NOMOGRAMA DEL MOPT PARA CAJONES CON CONTROL A LA ENTRADA.....	V-5
FIGURA V-3. CURVA DE DESCARGA CUNETAS.....	V-8
FIGURA V-4. ESQUEMA DE RÁPIDAS ESCALONADAS.....	V-9

CAPITULO I

I. GENERALIDADES

I.1 Introducción

Los proyectos viales a través del sistema de concesión, tienen como propósito principal impulsar la competitividad interna y externa del país, mediante dotación de estructuras viales estratégicamente ubicadas, capaces de atender las demandas presentadas por el desarrollo de las actividades económicas y sociales del país.

Como parte del Programa para el Desarrollo de Concesiones de Autopistas 2006 – 2014, se ha incluido uno de los tramos progresivos proyectados a la concesión consistente en la construcción de la Doble Calzada de la Variante de Palmar de Varela-Sabanagrande; la cual incluye el diseño de cinco (5) intersecciones a nivel (Glorietas).

AUTOPISTAS DEL SOL S.A., dado lo anterior, suscribió con **TECNOCONSULTA S.A.S.**, el contrato cuyo objeto es: “ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DEFINITIVOS DE LA DOBLE CALZADA DE LA VARIANTE DE PALMAR DE VARELA”. En el presente informe se presentará la información relacionada con los análisis hidrológicos, hidráulicos y de socavación.

I.2 Antecedentes

La región costera norte del país, se proyecta como un polo estratégico de desarrollo sobre el Caribe Colombiano. Su excelente ubicación geográfica, atractivos turísticos, recursos naturales y las extraordinarias zonas portuarias, resultan ser fortalezas que proyectan su despegue económico. Hechos como los tratados de libre comercio y el proyecto de la Ruta de las Américas, que permitirá conectar por vía terrestre a Panamá con Colombia y Venezuela, se constituyen en extraordinarias oportunidades para potenciar la conectividad del tránsito terrestre automotor de esta zona con el centro del País y cumplir el viejo sueño de unir por medio de una ruta terrestre las tres Américas.

Consciente de esta situación, el Ministerio de Transporte de la República de Colombia, a través del Instituto Nacional de Concesiones (INCO), hoy en día ANI – AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA, en una primera etapa otorgó el Contrato de Concesión vial Ruta Caribe a **LA SOCIEDAD AUTOPISTAS DEL SOL.**, el cual hace parte del Programa para el Desarrollo de Concesiones de Autopistas 2006 – 2014. El alcance de esta primera etapa comprende los siguientes tramos:

- TRAYECTO No. 1: Cartagena – Turbaco – Arjona
- TRAYECTO No. 2: Cartagena – Bayunca

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

- TRAYECTO No. 3: Palmar de Varela – Malambo
- TRAYECTO No. 4: Sabanalarga – Palmar de Varela
- TRAYECTO No. 5: Bayunca – Sabanalarga
- TRAYECTO No. 6: Arjona – El Viso
- TRAYECTO No. 7: Malambo - Barranquilla

Como tramos progresivos a la Concesión se han proyectado los siguientes:

- Puente Vehicular Gambote
- Ampliación de la Calle 30 en Barranquilla desde el puente Simón Bolívar hasta la entrada al Aeropuerto Ernesto Cortizos
- Segunda calzada y diseño de la rehabilitación del tramo existente de Gambote - Variante – Mamonal (30 km) y de la variante de Cartagena (10 Km)
- Doble Calzada de la variante de Palmar de Varela incluyendo el diseño de cinco (5) intersecciones a nivel (Glorietas).

Dentro de este contexto, en el presente documento se sintetizan los resultados del estudio de hidrología, hidráulica y socavación para el Proyecto “Estudios y diseños de la doble calzada de la variante de Palmar de Varela, incluyendo el diseño de cinco (5) intersecciones a nivel”.

I.3 Localización del Proyecto

El proyecto se encuentra localizado al norte del país, paralelo a la Carretera Oriental, en el Departamento de Atlántico en zona aledaña a los municipios de Palmar de Varela, Santo Tomás y Sabanagrande, que se ubican en la margen izquierda del Río Magdalena; esta zona geográfica posee recursos pesqueros y es considerada como una despensa agrícola. La vía Oriental mejora la conectividad terrestre de estos municipios con la ciudad de Barranquilla, considerada como uno de los mayores centros de desarrollo regional del Caribe Colombiano. Los cuerpos de agua están representados por las ciénagas: Luisa, Larga, Manatí y Paraíso.

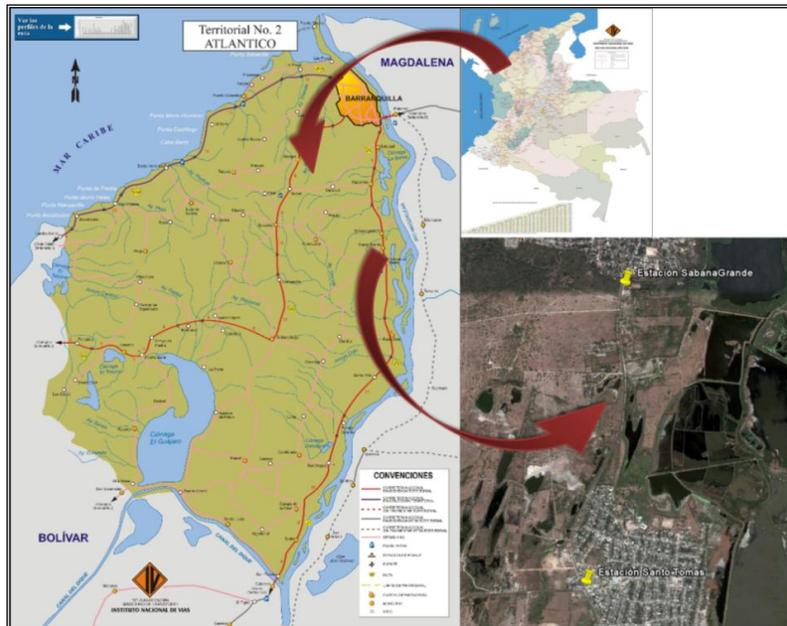
En la FIGURA I-1 se observa la localización del proyecto a nivel nacional y departamental y en la FIGURA I-2 se presenta la localización del tramo en estudio a nivel regional.

La Variante Palmar de Varela – Sabanagrande comienza en el K18+800 del Proyecto de la Segunda Calzada Sabanalarga – Palmar de Varela en el Departamento del Atlántico, avanza en dirección Sur – Norte definiéndose el límite del proyecto a la salida del municipio de Sabanagrande, en el PR64+500 de la vía Oriental, aproximadamente a 300 metros al sur del peaje existente.

TC-2082-135

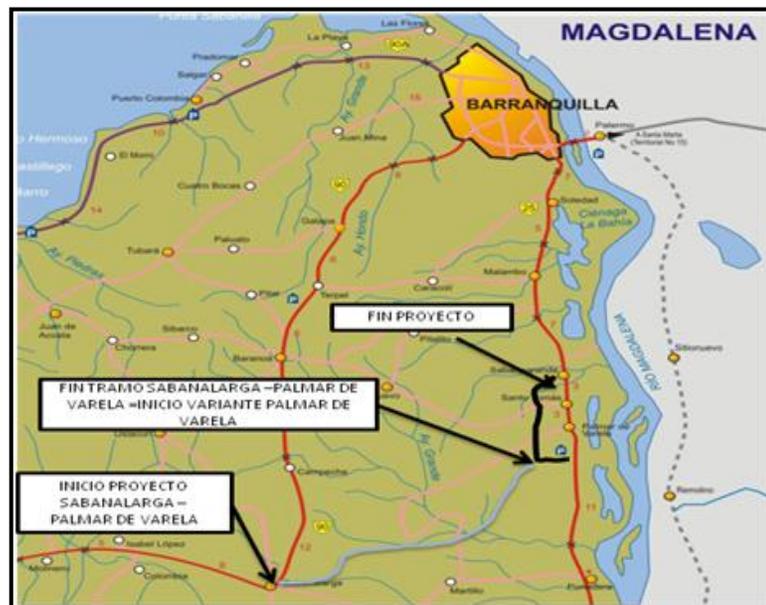
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

FIGURA I-1. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA VARIANTE PALMAR DE VARELA



Fuente: www.invias.gov.co

FIGURA I-2. LOCALIZACIÓN ESPECÍFICA DE LA VARIANTE PALMAR DE VARELA



TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

CAPITULO II

II. OBJETIVOS

II.1 Objetivo General

Definir las cuencas hidrográficas aferentes a la zona del proyecto, definir las obras hidráulicas y establecer los caudales máximos en los sitios de cruce de la vía, con el fin de dimensionar las obras resultantes y de utilizarlos, posteriormente, en los cálculos hidráulicos y de socavación.

II.2 Objetivos Específicos

- Establecer los caudales máximos en los sitios de cruce de la vía.
- Dimensionar el sistema de drenaje de la Variante Palmar de Varela, con base en la determinación de los caudales máximos.
- Verificar las crecientes de diseño para que el cauce pueda transitar holgadamente a través de las estructuras proyectadas.
- Garantizar la estabilidad de las estructuras de drenaje respecto a los procesos erosivos que sufre el cauce después de las crecientes.

CAPITULO III

III. ALCANCE Y METODOLOGÍA

III.1 Alcance de los estudios

El alcance del estudio hidrológico comprende la definición de los caudales máximos en los sitios de cruce de la vía. Se tomaron como referencia el Manual de Drenajes para Carreteras de Inviés de Diciembre de 2009, para definir los caudales para alcantarillas y para puentes con luces mayores a 10 m y menores a 50 m.

El alcance del estudio hidráulico contempla la definición del número de obras que demande el proyecto y la determinación de la capacidad hidráulica de cada estructura que cruza la vía, según se desprende del estudio hidrológico.

Para el diseño de las alcantarillas se tomó un período de retorno de 25 años y para el caso de cruces de vías con anchos menores a 50 m., se tomó un período de retorno de 50 años.

III.2 Metodología General

La metodología utilizada en el desarrollo técnico del presente informe se presenta a continuación:

- Recopilación de la información existente relacionada con la hidrología de la zona de estudio.
- Análisis de la cartografía existente, información meteorológica e hidrológica; así como el análisis de lluvias del sector.
- Cálculo de los caudales máximos para determinar los resultados de las crecientes de diseño en cada sitio de cruce.
- Descripción y análisis de los parámetros hidráulicos de cada sección de cruce.
- Presentación de los resultados del estudio y de las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO IV

IV. ESTUDIO DE HIDROLOGÍA

IV.1 Recopilación y análisis de la información existente

La actividad de recopilación y análisis de la información básica se concentró en los aspectos de cartografía general y específica, secciones topográficas, datos de lluvias y caudales de las estaciones existentes.

En el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se obtuvieron los planos en escala 1:25.000 y 1:100.000, utilizados en la definición de las cuencas del proyecto.

En el IDEAM se obtuvieron los registros de lluvias de las estaciones cercanas a las cuencas hidrográficas de la zona en estudio.

Adicionalmente la información fue complementada con una visita técnica realizada en la zona del proyecto, con la cual se pudo evidenciar que el trazado previsto del proyecto es de alguna manera paralelo al cauce del río Magdalena y que el drenaje corre en el sentido oeste este, entregando en las ciénagas bajas ubicadas al este de la vía Oriental.

IV.2 Cartografía

En el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC se recopiló la información cartográfica de toda la zona del proyecto. La selección fue la siguiente:

Escala 1:25.000:
Planchas números: 17-IV, C, D; 24-II- A, B

Escala 1:100.000:
Planchas números: 17, 24

Mediante el uso de la cartografía disponible se determinaron los parámetros morfométricos de las cuencas, como área, longitud, pendiente, necesarios para evaluar posteriormente los caudales en los sitios de cruce de la vía. En el Anexo No.1 se presentan las planchas del IGAC.

IV.3 Información Hidrometeorológica

Antes de iniciar el procesamiento de la información fue necesario evaluar "a priori" las condiciones de los datos utilizables en función de la historia de la estación, la calidad, representatividad y garantía de los datos.

La selección de las estaciones del proyecto se realizó según el criterio de proximidad geográfica y semejanza de precipitaciones. En el Anexo No.2 se presenta un registro fotográfico.

IV.3.1 Precipitación

Se recolectó en el IDEAM la información Hidrometeorológica asociada al alineamiento de la vía entre Barranquilla y Ponedera; se tomaron los registros de tres estaciones de precipitación a saber: Polonuevo y Ponedera, ubicadas en el municipio que llevan su nombre y la estación del Aeropuerto Ernesto Cortizos, que se tomó como de referencia. La información relacionada con estas estaciones se muestra en el CUADRO IV-1.

Las estaciones antes indicadas muestran registros pluviométricos según se relacionan a continuación:

Polonuevo, identificada con código 2904008, periodo 1959-2008, con 50 años de registros.

Ponedera, identificada con código 2904007, periodo 1959-2007, con 48 años de registros.

Aeropuerto Ernesto Cortizos, identificada con código 2904502, periodo 1941-2008, con 68 años de registros.

La información es homogénea y confiable entre las cotas 8 msnm y 80 msnm y con registros de más de 50 años, considerándose representativa de las características pluviométricas de la zona de estudio.

CUADRO IV-1. ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN

CÓDIGO IDEAM	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	MUNICIPIO	CORRIENTE	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PERIODO	AÑOS DE SERVICIO	LLUVIA ANUAL (mm)
2904008	POLONUEVO	PM	POLONUEVO	MAGDALENA	80	1959-2008	50	1177
2904007	PONEDERA	PM	PONEDERA	MAGDALENA	8	1941-2008	66	1006
2904502	A. ERNESTO CORTIZOS	PM	SOLEDAD	MAGDALENA	14	1941-2008	50	802

– **Precipitación Media**

En el CUADRO IV-2 se muestran las lluvias medias mensuales multianuales en las estaciones cercanas a la zona del proyecto y, en las FIGURAS IV-1 y IV-2, se muestra los pluviogramas de las estaciones de Polonuevo y de Ponedera, seleccionadas para el estudio y análisis de la cuenca.

La distribución temporal de la lluvia en el sector tiene una tendencia mono modal, la cual presenta un período de pocas lluvias de diciembre a marzo; el período húmedo transcurre de abril a noviembre, siendo septiembre y octubre los meses con mayor pluviosidad.

La precipitación, en las cuencas de drenaje del proyecto es de 1100 mm en promedio; la zona es baja y puede considerarse húmeda y con muy poca pendiente de escurrimiento.

CUADRO IV-2. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm)

NOMBRE DE ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
POLONUEVO	8,2	2,9	12,3	68,6	142,5	141,5	135,8	152,8	176,4	196,6	114,7	24,5	1176,8
PONEDERA	2	7,4	11,2	71,2	105,2	107,1	102,5	135,1	159	168,5	109,8	27,3	1006,3
A. ERNESTO CORTIZZOS	3,4	0,7	0,9	23,2	97,7	90,3	69,9	97,5	146,7	168,8	80,7	22	801,8

FIGURA IV-1. PLUVIOGRAMA MEDIO MENSUAL ESTACIÓN POLONUEVO

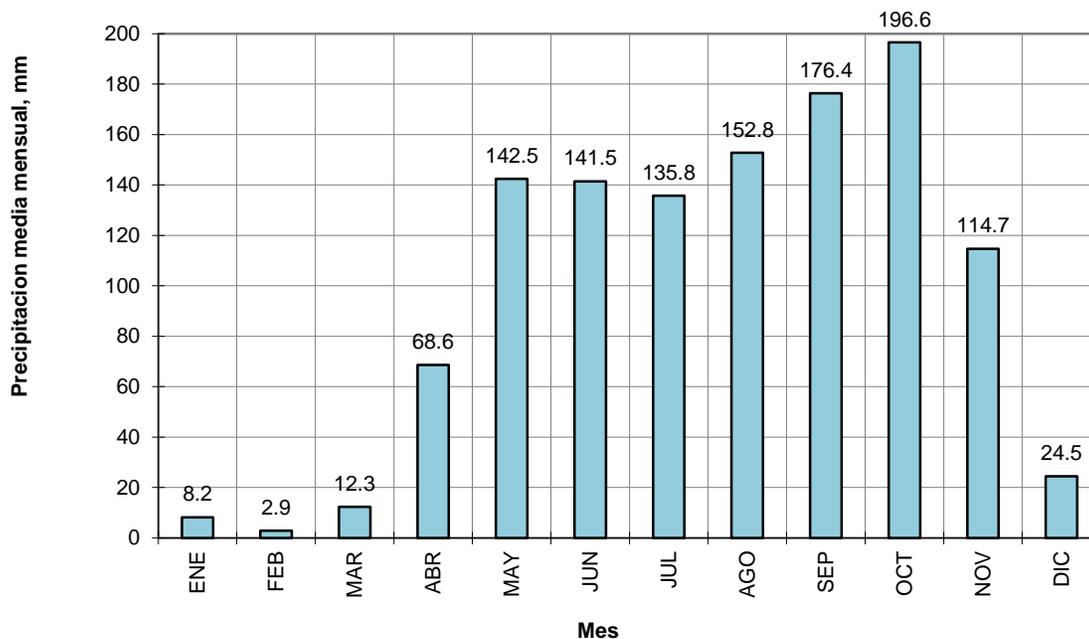
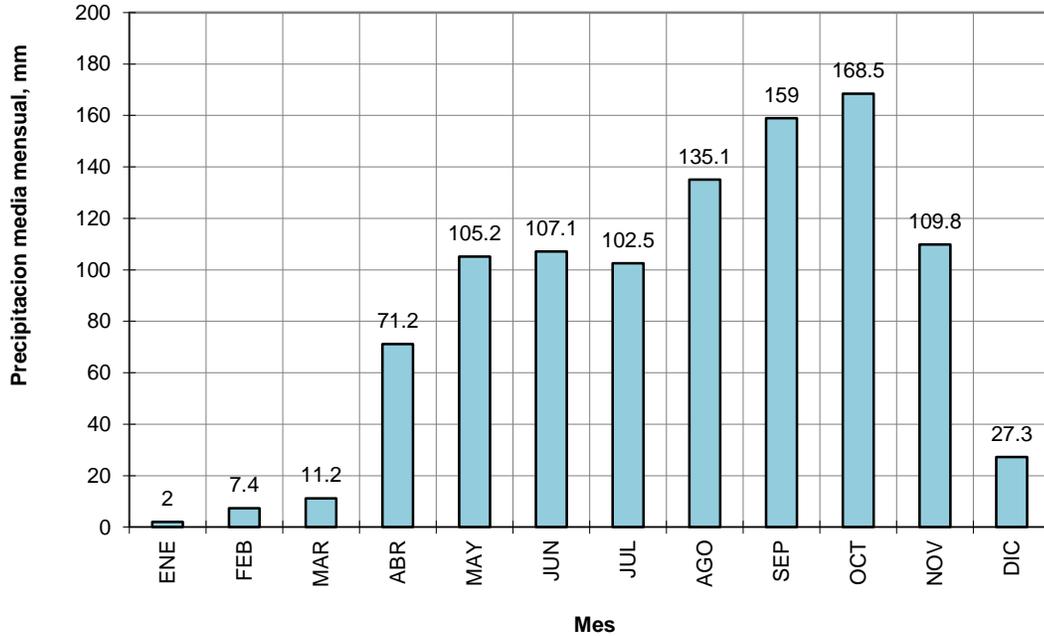


FIGURA IV-2. PLUVIOGRAMA MEDIO MENSUAL ESTACIÓN PONEDERA



– **Precipitación Máximas en 24 horas**

En el CUADRO IV-3 se presentan las precipitaciones máximas en 24 horas, mes a mes, multianuales de las estaciones seleccionadas.

CUADRO IV-3. PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

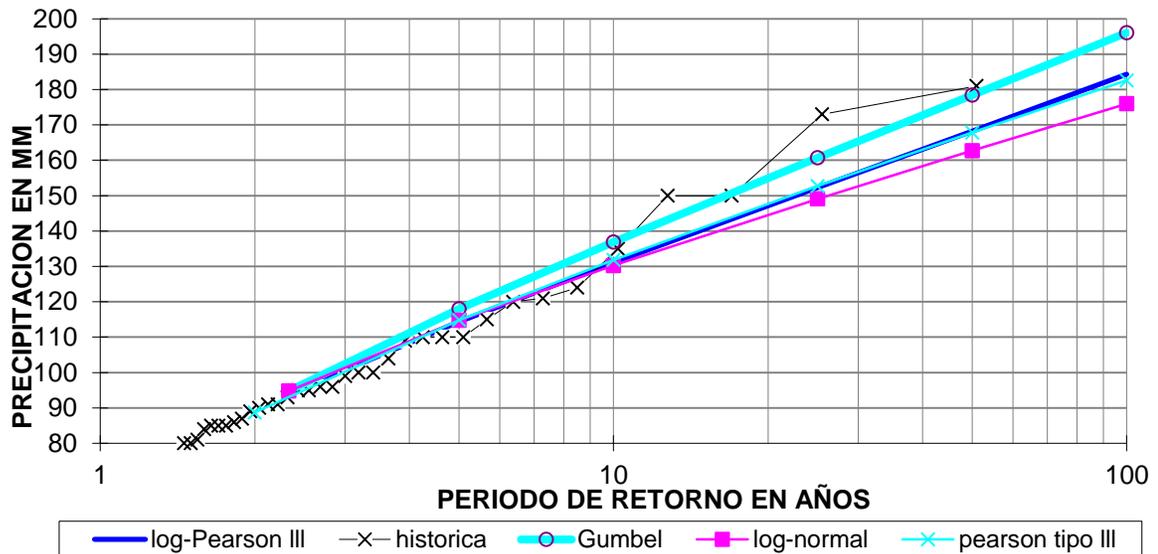
NOMBRE DE ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
POLONUEVO	67	21	70	150	124	135	150	140	162	181	100	61	181
PONEDERA	16	55	53	150	110	109	116	135	149	159	135	137	159
A. ERNESTO CORTIZZOS	62	7	12	57	119	104	101	100	93	123	98	118	123

En el CUADRO IV-4 se presenta el resumen de la serie anual de máximos en 24 horas para las estaciones de Polonuevo y Ponedera y, en la FIGURA IV-3, se muestra la distribuciones de probabilidades de máximos, con las tendencias de Gumbel, log-pearson tipo III, log-normal y Pearson tipo III para la estación Polonuevo, como la representativa de la vía, con 40 años de registros.

CUADRO IV-4. RESUMEN DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS (mm)

AÑO	POLONUEVO	PONEDERA
1959	110	110
1960	115	90
1961	95	90
1962	50	61
1963	64	90
1964	95	90
1965	73	90
1966	96	58
1967	62	60
1968	85	82
1969	150	128
1970	85	98
1971	60	60
1972	50	63
1973	110	87
1974	80	132
1975	75	157
1976	93	100
1977	80	157
1978	90	157
1979	120	
1980	91	
1981	65	107
1982	135	55
1983	99	80
1984	75	96
1985	100	80
1986	74	72
1987	110	59
1988	181	159
1989	173	159
1990	91	65
1991	104	67
1992	100	114
1993	84	93
1994	96	42
1995	150	123
1996	109	115
1997	64	95
1998	89	137
1999	53	107
2000	124	116
2001	87	72
2002	86	150
2003	74	95
2004	77	80
2005	81	90
2006	77	91
2007	85	135
2008	121	

FIGURA IV-3. ESTACIÓN POLONUEVO. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS



Para las tormentas de diseño en las cuencas de cruce de la vía se tomó la información de la estación de Polonuevo, por ser la más cercana a la zona del proyecto. A continuación se resumen los resultados del análisis de Gumbel, cuyas tormentas son inferiores a 12 horas de duración.

<u>Años</u>	<u>Polonuevo, mm</u>
2,33	95
5	117
10	136
25	159
50	176
100	193

Los máximos aguaceros registrados en el área corresponden a valores entre 50 mm hasta 181 mm. De la información de los residentes del sector se pudo establecer que estos aguaceros son característicos del Caribe Tropical, con tiempos menores a 6 horas. A modo de referencia se muestra la información asociada a la Estación del Aeropuerto E. Cotizos en el CUADRO IV-5.

CUADRO IV-5. DATOS CLIMATOLÓGICOS DEL AEROPUERTO ERNESTO CORTIZZOS

IDEAM 2904502													
LATITUD 1053N		LONGITUD 7546W		periodo 1941 - 2008									
ELEVACIÓN 14 msnm													
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN, mm													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	3,4	0,7	0,9	23,2	97,7	90,3	69,9	97,5	146,7	168,8	80,7	22	801,8
MÁXIMOS	133	8	14,6	142,9	320,8	271,4	296,8	309,9	299,5	375	242,7	241,1	375
MÍNIMOS	0	0	0	0	0	1	0	1	20	19	1	0	0
VALORES TOTALES MENSUALES DE EVAPORACIÓN, mm													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	156	161	176	155	132	134	144	143	123	124	111	132	1691
MÁXIMOS	186	190	211	197	162	159	186	174	199	183	136	161	211
MÍNIMOS	128	120	143	128	69	99	114	117	91	99	93	84	69
VALORES MEDIOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA, %													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	74	73	74	77	80	81	79	80	82	83	82	78	79
MÁXIMOS	85	85	84	83	87	87	88	88	90	88	89	86	90
MÍNIMOS	58	58	65	69	71	71	72	70	67	77	74	68	58
NUMERO DE DÍAS CON LLUVIA													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	0	0	0	3	9	9	7	9	13	15	8	2	75
MÁXIMOS	4	2	4	11	16	19	15	22	21	23	18	8	23
MÍNIMOS	0	0	0	0	0	2	1	1	3	6	1	0	0
VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA, °C													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	27,6	27,9	28,2	28,1	27,6	27,5	27,8	27,5	27,1	26,7	26,8	27,3	27,5
MÁXIMOS	28,9	29,4	29,8	29,7	28,9	29,4	29,4	29	28,3	27,9	28,5	28,9	29,8
MÍNIMOS	26,1	26,3	26,6	26,6	26,2	26,4	26,3	26,1	25,7	25,5	25,6	25,6	25,5
VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE TEMPERATURA, °C													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	36,3	37	37,3	36,8	36	35,1	35,8	35,6	35,2	34,4	34,3	35,3	35,8
MÁXIMOS	40	40	40	41	40	38,5	39	38	38	40	38	38,5	41
MÍNIMOS	33,4	34,3	35	34,4	32,6	33,2	32,4	32,4	32	32	31,4	31,8	31,4
VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE TEMPERATURA, °C													
VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
MEDIOS	19,7	20,1	20,4	20,5	20,3	20,1	20,2	19,9	19,7	20,2	20,3	20	20,1
MÁXIMOS	23,9	21,8	23	23	22,4	22	22,6	21,6	21,6	22	22,5	21,5	23,9
MÍNIMOS	17,5	18	18,5	18	17,4	17,4	18	18	17	17	17,4	16	16

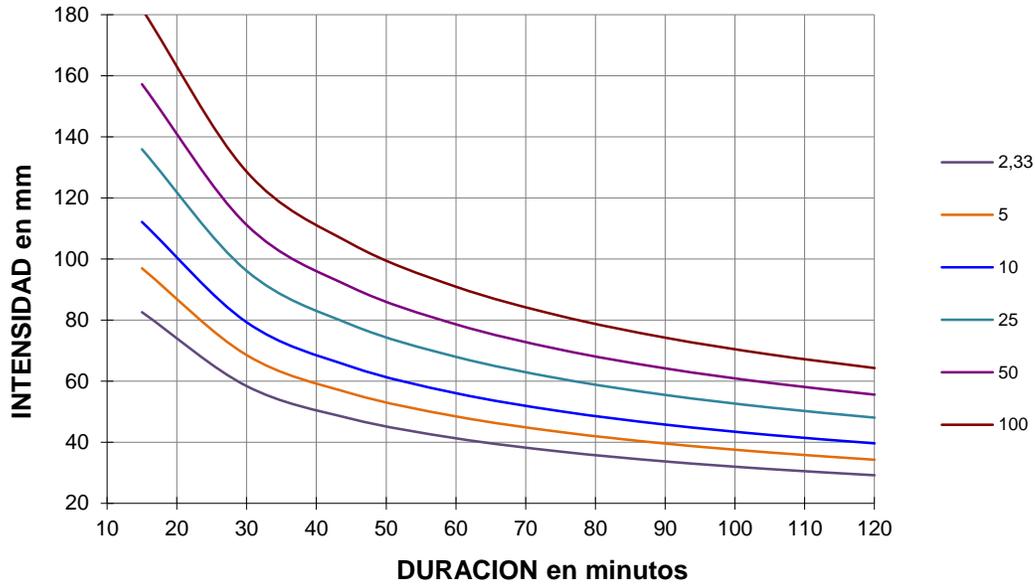
Para la distribución del hietograma de diseño se utilizó la información de la curva I-D-F de la Estación Polonuevo que se presenta en la FIGURA IV-4, CUADRO IV-6. A la

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

intensidad de 100 años se le aplicó la metodología del bloque alterno en donde las alturas de precipitación se ordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración utilizada (Td) y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y la izquierda del bloque central formando el hietograma de diseño que se presenta en la FIGURA IV-5.

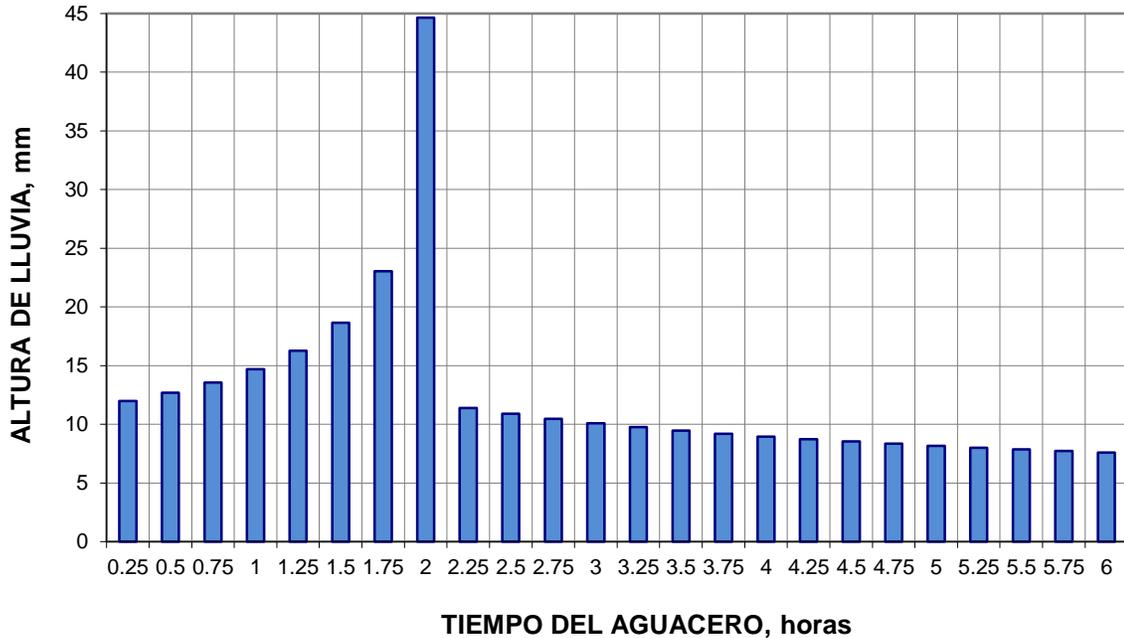
FIGURA IV-4. CURVA IDF ESTACIÓN POLONUEVO



CUADRO IV-6. CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA POLONUEVO

DURACIÓN minutos	INTENSIDAD (mm/hora)					
	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS					
	2,33	5	10	25	50	100
15	82,6	97,0	112,2	136,0	157,3	181,9
30	58,4	68,6	79,3	96,1	111,2	128,6
45	47,7	56,0	64,8	78,5	90,8	105,0
60	41,3	48,5	56,1	68,0	78,6	91,0
75	36,9	43,4	50,2	60,8	70,3	81,4
90	33,7	39,6	45,8	55,5	64,2	74,3
105	31,2	36,7	42,4	51,4	59,4	68,8
120	29,2	34,3	39,7	48,1	55,6	64,3
135	27,5	32,3	37,4	45,3	52,4	60,6
150	26,1	30,7	35,5	43,0	49,7	57,5
165	24,9	29,2	33,8	41,0	47,4	54,8
180	23,8	28,0	32,4	39,2	45,4	52,5

FIGURA IV-5. HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN 100 AÑOS ESTACIÓN POLONUEVO



IV.3.2 Climatología

En el CUADRO IV-5, se resume la información de climatología de la estación Aeropuerto Ernesto Cortizos, para el periodo 1941-2008, en donde se presentan los principales parámetros del clima, que a continuación se comentan:

La evaporación promedio tiene un valor de 2780 mm en el tanque clase A, siendo abril el mes de mayor evaporación con 270 mm y noviembre el de menor evaporación con 125 mm.

La humedad relativa media es del 80%, con variaciones estacionales entre 73 a 93%.

El brillo solar tiene 2458 horas de sol al año, con variaciones mensuales entre 85 a 302 horas al mes.

La temperatura promedio es de 27.5 °C con variaciones promedios entre 24.9 a 29.8 °C.

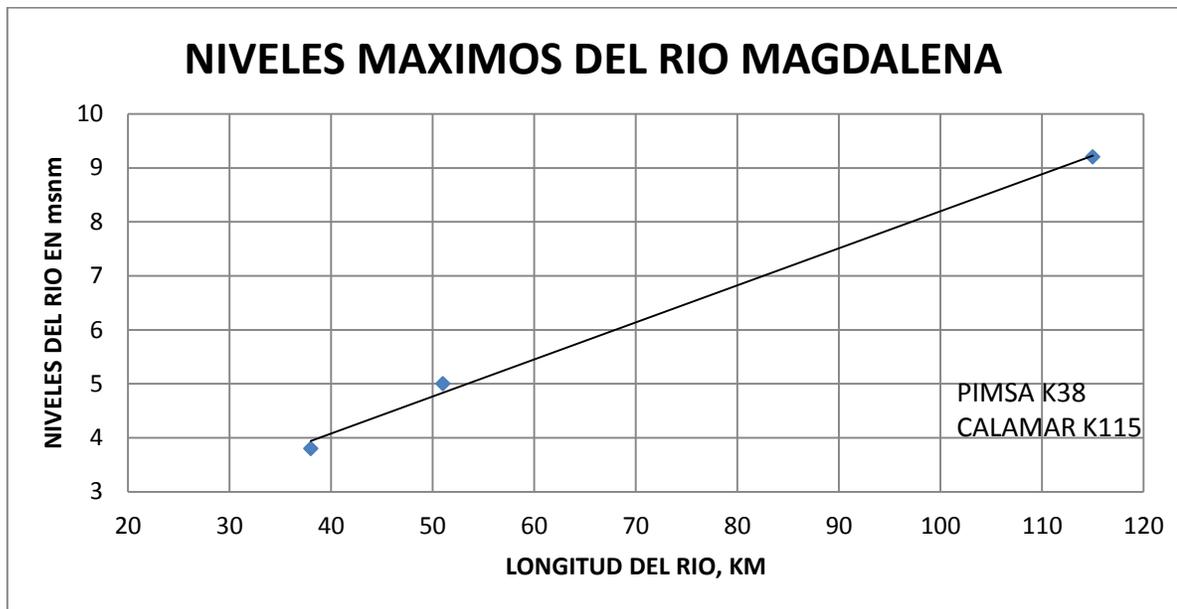
La temperatura máxima promedio es de 34.8 °C al medio día y en las tardes.

La temperatura mínima promedio es de 22.1 °C en las madrugadas

IV.3.3 Niveles

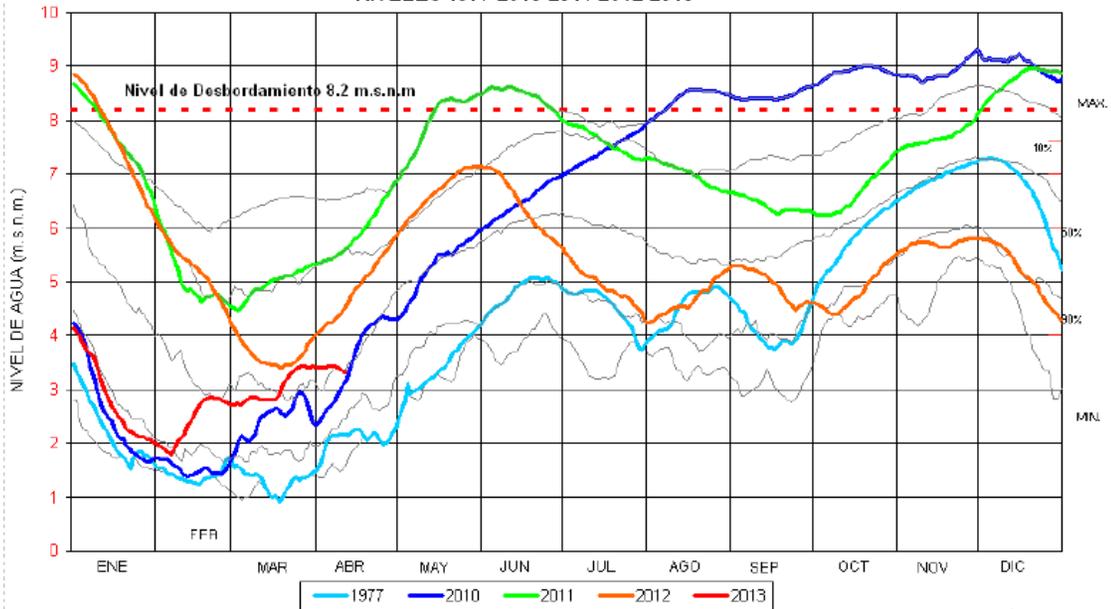
Niveles Máximos

En Calamar (Km 115) el nivel máximo registrado fue de 9,20 msnm, en diciembre de 2010 y en Pimsa (Km 38) el nivel máximo registrado fue de 3,80 msnm, en la misma fecha, producto de las inundaciones ocurridas el mismo año. Estableciendo una correlación lineal para el km 51, frente a Palmar de Varela, se tendría un nivel máximo de inundación del río de 5,00 msnm, por lo que se recomienda que la rasante de la vía esté por encima de la cota antes indicada, previos análisis de las cuencas de Arroyo Boyé y Arroyo Caña Fístula para sus áreas aferentes, para no ser afectada por los niveles de inundación del Río Magdalena.

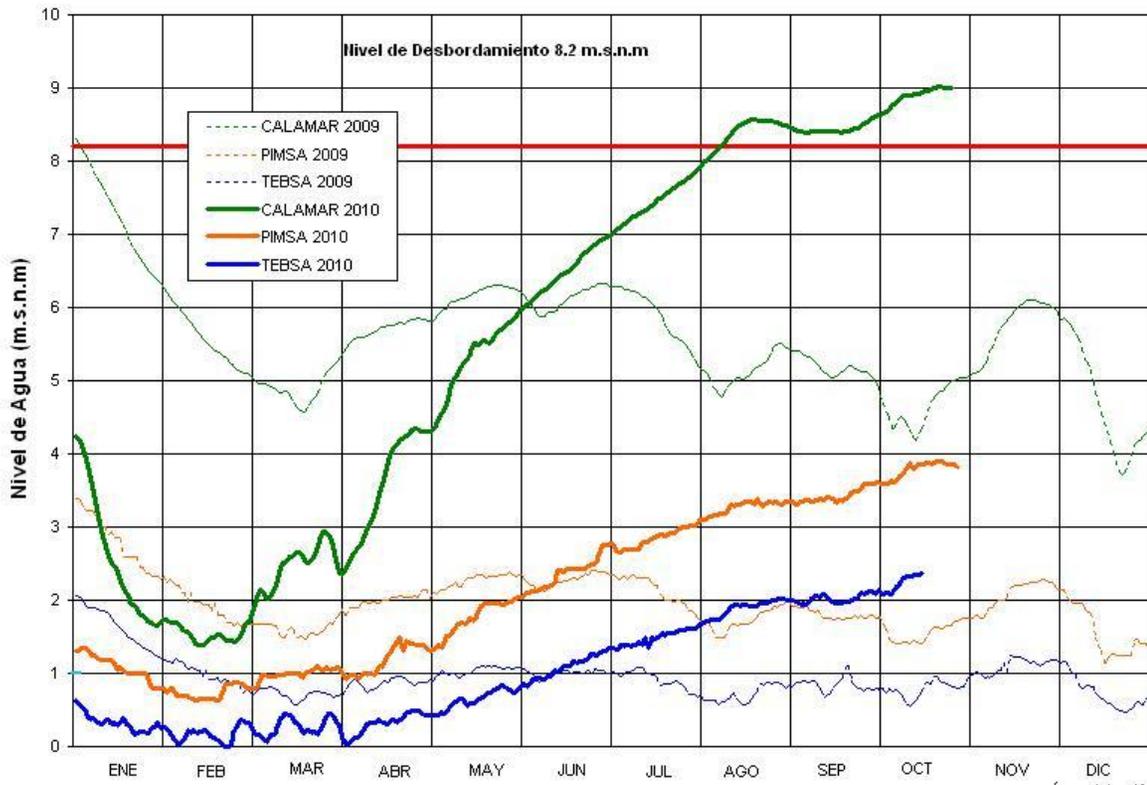


Respecto de los niveles del Río Magdalena, en las gráficas que siguen a continuación se muestra la información del río en la estación de Calamar, San Pedrito (Km 115).

RIO MAGDALENA - ESTACION CALAMAR - IDEAM
FRECUENCIA DE NIVELES EXCEDIDOS 1967-2012
NIVELES 1977-2010-2011-2012-2013



NIVELES 2009 - 2010



TC-2082-135
 Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
 Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
 Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

IV.4 Justificación de las fórmulas empleadas

Las fórmulas empleadas, que se describen más adelante, se justifican y se sustentan ampliamente en la literatura que se relaciona en el Capítulo VIII. Bibliografía. Generalmente son las que se utilizan en los procedimientos de modelación hidrológica por la comprobada bondad y ajuste de sus resultados.

IV.5 Aplicación de Teorías y Métodos de Predicción

IV.5.1 Metodología utilizada en el cálculo de las crecientes

El cálculo de los caudales máximos en los sitios de cruce de la vía fue dividido en función del área de la cuenca; para cuencas menores a 500 has se utilizó el método Racional y para cuencas mayores a 500 has se utilizó el método que establece una relación lluvia - cuenca - caudal, más conocido como el método del Soil Conservation Service (SCS), el cual se utiliza cuando no se dispone de información hidrológica.

El cálculo de los caudales de las alcantarillas se hizo para los períodos de retorno 10 y 25 años, con el fin de evaluar la capacidad de las obras existentes para estos dos periodos de retorno.

IV.5.2 Caudales de diseño para Cuencas Menores de 500 Ha

El método "Racional" es utilizado en Hidrología por su sencillez para generar caudales en cuencas pequeñas hasta 500 Has, donde no exista información hidrométrica. Cuando se usa el método Racional, se supone que la máxima variación del caudal, correspondiente a una lluvia de cierta intensidad sobre el área, es producida por la lluvia que se mantiene por un tiempo igual al que tarda el caudal máximo en llegar al punto de observación considerado. Teóricamente éste período es el tiempo de concentración, que se define como el tiempo requerido por el escurrimiento superficial para llegar desde la parte más lejana de la cuenca hasta el punto a estudiar.

De acuerdo con la ref. 1, Capítulo 15, Pág. 509, la fórmula Racional se expresa en los siguientes términos:

$$Q = \frac{(C * I * A)}{3.6}$$

Donde:

Q	=	Caudal máximo (m ³ /s)
C	=	Coefficiente de escorrentía, que depende de la pendiente, cobertura y suelos (adimensional < 1.0)
I	=	Intensidad de la lluvia más desfavorable (mm/h)
A	=	Superficie de drenaje de la cuenca (Km ²)

El *coeficiente de escorrentía*, relaciona el volumen total del agua precipitada con el volumen real de la escorrentía producida después de descontar las pérdidas por almacenamiento, retención e infiltración, y es propio de cada cuenca y depende de la morfometría, del tipo de suelo, la cobertura y la condición de humedad antecedente.

La *intensidad* se selecciona para una duración igual a la del tiempo de concentración propio de la cuenca y para el período de retorno establecido, por lo cual, el caudal calculado corresponderá a la creciente con una frecuencia igual a la de la precipitación con la intensidad seleccionada.

El valor del *tiempo de concentración* de una cuenca es función de sus características morfológicas y puede estimarse teóricamente. Ramser Kirpich determinó, para cuencas pequeñas de uso agrícolas, el tiempo de concentración, considerándolo como el tiempo necesario para que el nivel del agua en un sitio específico, se eleve desde el mínimo registrado antes del escurrimiento hasta que se produzca la máxima elevación registrada en ese sitio. La fórmula adoptada para el presente estudio es la desarrollada por Kirpich, la cual se representa de la siguiente forma:

$$T_c = 3.9756 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

T _c	=	Tiempo de concentración, en minutos
L	=	Longitud del cauce hasta el sitio de interés en Km.
S	=	Pendiente media de la cuenca (m/m)

– Curva Intensidad – Duración – Frecuencia

Para la aplicación del método Racional se requiere conocer la Intensidad y el Tiempo de Duración de la lluvia para un periodo de retorno determinado. Para la zona de estudio se calculó la curva de Intensidad - Duración - Frecuencia en Polonuevo, con base en el periodo 1959-2008 con 50 años de registros, utilizando las ecuaciones desarrolladas para la Región Caribe en el estudio “Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad – Duración – frecuencia para Colombia” elaborado por Rodrigo Vargas y Mario Díaz-Granados O.

$$I = 16.66 * \frac{T^{0.21}}{t^{0.50}} * M^{0.03} * N^{0.15}$$

Donde

I	=	intensidad en mm/hr
T	=	tiempo de retorno en años

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

- t = duración de la lluvia en horas.
M = valor promedio de precipitación máxima anual diaria, 37 mm
N = Número de días con lluvia al año, 63 días

(Ver CUADRO IV-6 donde se presentan los datos IDF de la FIGURA IV-5).

– Coeficiente de escorrentía

Para el *coeficiente de escorrentía*, C, a aplicar en la fórmula Racional, se tomó como base la Tabla 15.1.1, pág. 511 de la Referencia 1. Para la morfometría, tipo y uso de los suelos promedios de las cuencas en estudio, se tomó un valor entre 0.44 y 0.50 (área de pastizales mayor al 50 % del área y pendiente superior al 7%, para Tr= 10 y 25 años).

Es importante resaltar que este factor de escorrentía será variable en el tiempo y dependerá del manejo medioambiental de la cuenca, y fundamentalmente del uso del suelo que hacen los agricultores.

Para la determinación de los parámetros morfométricos de las cuencas, tales como longitud del cauce principal, área de drenaje y diferencia de nivel desde el punto más alto de la cuenca hasta el punto de intersección con la vía, y la pendiente media del cauce, se utilizó la cartografía disponible. La localización y nomenclatura de las cuencas se presenta en el Anexo No.3.

En la variante Palmar de Varela se tienen 36 obras de cruce de la vía repartidas así: Para cuencas menores de 500 Ha., 34 obras conformadas por 4 alcantarillas de 36" y 30 Box culverts, de los cuales 4 se utilizarán como pasaganado y drenaje de agua. Para cuencas mayores a 500 Has., 1 Box culverts correspondientes al Arroyo Boye y 1 puente correspondiente al Arroyo Caña Fistula. No se incluyen en este inventario, las obras de drenaje de la Glorieta 6 sobre la vía Oriental en Sabanagrande. Para la conexión con la oriental se propusieron siete (7) Box culvert cada uno de 3x1.5 m. La relación de los diseños de las estructuras mencionadas anteriormente, se presentan en el CUADRO IV-7 y CUADRO IV-8

Los tiempos de concentración y los caudales de diseño de las obras de drenaje de los cauces se presentan en el CUADRO IV-7, en el que se muestran las intensidades para un tiempo mínimo utilizado de 10 minutos sumado al tiempo de concentración de la cuenca y los caudales, para 10 y 25 años de periodo de retorno.

Por la escala de trabajo 1:25.000 se dibujó la divisoria de aguas alta, el área de drenaje se calculó como un rectángulo con base en la longitud entre la divisoria y la vía, multiplicado por la distancia de escurrimiento superficial entre alcantarilla y alcantarilla vecina, en la dirección de la pendiente longitudinal del eje vial.

CUADRO IV-7. CAUDALES HIDROLÓGICOS PARA CUENCAS MENORES DE 500 Ha. MÉTODO RACIONAL

Estructura de cruce	Abscisa Der m	Abscisa Izq m	Área (Ha)	Pendiente media m/m	Tiempo de concentración (min)	Coefficiente Escorrentía 10 años	Coefficiente Escorrentía 25 años	Intensidad 10 años (mm/h)	Intensidad 25 años (mm/h)	Caudal 10 años (m ³ /s)	Caudal 25 años (m ³ /s)
1	19418	19455	142.65	0.01	10	0.44	0.5	128	155	22.32	30.71
2	19678	19710	59.23	0.01	10	0.44	0.5	128	155	9.27	12.75
3	19914	19957	36.36	0.01	10	0.44	0.5	128	155	5.69	7.83
3A	20450	20490	37.30	0.01	10	0.44	0.5	128	155	5.84	8.03
4	20590	26630	20.83	0.01	10	0.44	0.5	128	155	3.26	4.48
5	20660	20700	38.95	0.01	10	0.44	0.5	128	155	6.09	8.39
6	21630	21650	58.32	0.01	10	0.44	0.5	128	155	9.25	12.50
7	21930	21950	17.28	0.01	10	0.44	0.5	128	155	2.70	3.72
9	23010	23045	9.64	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.51	2.08
9A	23140	23170	9.31	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.50	2.08
10	23425	23450	39.25	0.01	10	0.44	0.5	128	155	6.03	8.25
11	23880	23898	6.60	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.03	1.42
11A	24170	24200	13.14	0.01	10	0.44	0.5	128	155	2.01	3.01
12	24560	24600	35.5	0.01	10	0.44	0.5	128	155	5.55	7.64
13	24870	24890	11.3	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.77	2.43
14	25075	25125	6.64	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.04	1.43
15	25220	25290	4.51	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.71	0.97
16	25370	25420	3.50	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.55	0.75
17	25460	25510	3.30	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.52	0.71
18	25580	25630	6.34	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.99	1.36
19	25940	25985	2.16	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.34	0.47
21	26330	26360	9.86	0.01	10	0.44	0.5	128	155	1.54	2.12

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela, Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

Estructura de cruce	Abscisa Der m	Abscisa Izq m	Área (Ha)	Pendiente media m/m	Tiempo de concentración (min)	Coefficiente Escorrentía 10 años	Coefficiente Escorrentía 25 años	Intensidad 10 años (mm/h)	Intensidad 25 años (mm/h)	Caudal 10 años (m ³ /s)	Caudal 25 años (m ³ /s)
22	26400	26440	2.48	0.01	10	0.44	0.5	128	155	0.39	0.53
23	26530	26570	76.26	0.01	10	0.44	0.5	128	155	11.93	16.42
24	27035	27075	136.18	0.01	10	0.44	0.5	128	155	21.30	29.32
25	27090	27135	125.58	0.01	10	0.44	0.5	128	155	19.65	27.03
27A	27600	27594	38.01	0.01	10	0.44	0.5	128	155	5.95	8.02
28	27812	27806	13.81	0.01	10	0.44	0.5	128	155	2.00	3.01
29	28280	28300	24.62	0.01	10	0.44	0.5	128	155	3.85	5.30

CAUDALES HIDROLÓGICOS PARA CUENCAS MENORES DE 500 Ha. CONECTANTE CON LA ORIENTAL

Estructura de cruce	Abscisa Der m	Abscisa Izq m	Área Ha	Pendiente media m/m	Tiempo de concentración min	Coefficiente escorrentía 10 años	Coefficiente escorrentía 25 años	Intensidad 10 años mm/hr	Intensidad 25 años mm/hr	Caudal 10 años m ³ /s	Caudal 25 años m ³ /s
1	K0+120	K0+120	32,64	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	5,09	7,01
2	K0+321	K0+325	34,96	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	5,45	7,51
3	K0+440	K0+440	44,84	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	6,89	8,0
4	K0+480	K0+480	44,84	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	6,89	8,0
5	K0+534	K0+534	44,84	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	6,89	8,0
6	K0+790	K0+790	30,00	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	5,0	7,0
7	K0+840	K0+840	76,26	0,01	10,0	0,44	0,50	128	155	5,8	8,4

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela, Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

**CUADRO IV-8. CAUDALES HIDROLÓGICOS PARA CUENCAS MAYORES DE 500 Ha
MÉTODO SCS**

Obra No	Estructura de cruce	Abscisa Izq m	Abscisa Der m	Área Ha	Longitud cauce m	Pendiente media m/m	Tiempo de concentración min	Caudal 25/50 Años m ³ /s
8	BOX ARROYO BOYE	22921	22969	1169.65	9500	0,005	173	35.6
20	PUENTE ARROYO CAÑA FISTULA	26107	26149	8493,6	23126	0,0048	349	215

IV.5.3 Caudales de diseño para Cuencas Mayores de 500 Ha

– Método del Soil Conservation Service (SCS)

En las cuencas donde no se dispone de información hidrológica, los caudales se determinaron con base en las relaciones lluvia - cuenca - caudal de acuerdo con la metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

La cuenca del Arroyo Caña Fistula se dividió en 6 subcuencas homogéneas; para cada subcuenca se determinaron las características morfométricas que se utilizan en el método del hidrograma unitario, a saber: área, longitud del curso principal, pendiente del cauce, tiempo de concentración y tiempo de recorrido a lo largo del cauce principal entre las subcuencas y el sitio de cruce de la vía.

El método del Soil Conservation Service estima que la escorrentía producida por una tormenta es función de la relación que existe entre la humedad antecedente del terreno y el complejo suelo - cobertura.

Toda la precipitación ocurrida antes del comienzo de la escorrentía se considera como pérdida (intercepción, almacenamiento en depresiones, infiltración inicial) y no contribuye al escurrimiento superficial.

Las pérdidas iniciales de la precipitación se denominan abstracciones iniciales (I_a), y se estiman con la siguiente relación teórica.

$$I_a = 0.2 * S$$

donde S es la retención potencial máxima en mm.

El escurrimiento o la precipitación efectiva fueron calculados por la ecuación:

$$E = \frac{[P - 5.08(1000 / CN - 10)]^2}{(P + 20.32(1000 / CN - 10))}$$

donde,

E	=	Escurrimiento en mm
P	=	Precipitación en mm
CN	=	Número de la curva

El S.C.S. analizó una gran cantidad de hidrogramas de cuencas, encontrando un procedimiento para calcular el valor de S con base en la Curva Número (CN), mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

en donde S, como ya se indicó, está expresado en milímetros.

El valor de CN para cada condición de humedad antecedente es propio de cada cuenca y se obtiene con base en el tipo de suelo y la condición hidrológica que se define:

Buena = Cobertura vegetal mayor del 75%
Regular = Cobertura vegetal entre el 50% y el 75%
Mala = Cobertura vegetal menor del 50%

El método impone que los suelos de la cuenca en estudio deben clasificarse dentro de los siguientes grupos de suelos:

- A = (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta velocidad de infiltración. Arenas y gravas profundas.
- B = (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con velocidades de infiltración moderadas, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y poco profundos.
- C = (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos de infiltración lenta, con bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de arcilla, arenas arcillosas poco profundas y arcillas.
- D = (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta. Suelos arcillosos con alto potencial expansivo, suelos salinos con nivel freático alto permanente.

En la referencia 1, Tabla 5.5.2, Pág. 154 se presentan los números de curva CN en función del grupo hidrológico y del uso de la tierra.

Para el presente estudio se consideró que la condición de humedad antecedente del suelo es intermedia (II), o sea, que el suelo no se encuentra saturado ni seco. Aplicando el criterio anterior se establece que los suelos de la cuenca del arroyo Caña Fistula se clasifican en el grupo C, zonas de pastizales en condición hidrológica buena; para la cuenca se adoptó un valor de **CN = 60**, equivalente a potreros con pasto.

Para calcular la escorrentía máxima se recurre al método del hidrograma unitario triangular, el cual está definido por las siguientes ecuaciones:

$$qp = \frac{0.208 * A * E}{T_p}$$

$$T_p = D/2 + 0.6 * T_c$$

$$T_b = 8/3 * T_p$$

Donde:

- qp = Caudal unitario máximo, en m³/s por cada mm de lluvia efectiva
A = Área de drenaje, en Km²
E = Escurrimiento unitario, en mm.
T_p = Tiempo al pico, en horas, medido desde el comienzo del hidrograma unitario.
D = Duración de la lluvia efectiva o del hietograma unitario en horas.
T_c = Tiempo de concentración de la cuenca, en horas; calculado con la expresión de Kirpich
T_b = Tiempo base del hidrograma unitario, en horas

En la FIGURA IV-5 se presenta el hietograma de diseño para 100 años de periodo de retorno.

IV.5.4 Crecientes en los Sitios de Cruce

En el CUADRO IV-7 se presenta, para cada cuenca menores a 500 Has, el tiempo de concentración, las intensidades y los caudales máximos calculados.

Para la cuenca del Arroyo Caña Fistula se calculó el hidrograma unitario, al cual se le aplicaron las lluvias efectivas determinadas como tormentas de diseño. (ver FIGURA IV-5).

A continuación se resumen los valores máximos de caudales (m3/seg) calculados en el sitio del cruce del Arroyo Caña Fistula:

Área vertiente	84,93	Km ²
Longitud del cauce principal	23.13	Km.
Cota del nacimiento	125	msnm
Cota del cruce	14	msnm
Lluvia medio anual	1100	mm
Lluvia máxima en 24 horas	181	mm
Número de días con lluvia	63	
Rendimiento medio anual	10	L/s-km ²
Caudal medio anual	0,849	m ³ /s

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

Creciente 2.33 años	73	m ³ /s
Creciente 5 años	109	m ³ /s
Creciente 10 años	139	m ³ /s
Creciente 25 años	182	m ³ /s
Creciente 50 años	215	m ³ /s
Creciente 100 años	250	m ³ /s

CAPITULO V

V. ESTUDIO HIDRÁULICO

V.1 Metodología para el desarrollo del estudio hidráulico

El procedimiento para la realización del estudio hidráulico fue el siguiente:

- Se localizaron en el proyecto los cruces existentes, separándolos en grupos de estructuras que drenan las cuencas mayores y menores de 500 Ha.
- Se definieron las condiciones de flujo y el tipo de control hidráulico en las estructuras para evaluar posteriormente, su capacidad respecto a los caudales estimados con un período de retorno de 25 años para las alcantarillas y los box - culvert y de 50 años para el caso de la cuenca de Arroyo Caña Fístula.
- Se determinaron los parámetros hidráulicos con base en la geometría obtenida de la topografía, registros y observaciones de campo; los parámetros faltantes se definieron a criterio según las normas vigentes y la bibliografía disponible.
- Se dimensionaron las obras de cruce mediante los caudales obtenidos en la modelación hidrológica.
- Otra parte importante del estudio fue la localización y evaluación hidráulica del drenaje superficial en cuanto a cunetas y drenes se refiere.
- Mediante inspección directa en el terreno se realizó un inventario de las estructuras menores en la Vía Oriental, en el tramo aferente al proyecto.

En el CUADRO V-1, se presenta el listado de las 36 estructuras que drenarán la variante Palmar de Varela, y las siete (7) que drenarán la conexión con la vía Oriental.

La morfología de la variante es una zona ondulada a plana, en donde los taludes permanecen secos y se tienen alcantarillas cada 220 m en promedio, la vía corre sobre una zona divisoria de aguas que se convierte en divisoria natural de aguas.

CUADRO V-1. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS MENORES

Obra Nº	Abscisa IZQ	Abscisa DER	Tipo	#	Diam (m)	Luz (m)	Altura (m)	COTAS		SENTIDO	So (m/m)	Caudal (m3/s)		Caudal(m3/s) 25 años	Diferencia (m3/s)	Condición Actual
								I-D	I-D			Tubo	Box			
1	19418	19455	BOX CULVERT	3		4.0	1.5	10.12	9.87	I-D	0.01		33.9	30.7	3.2	O.K
2	19678	19710	BOX CULVERT	2		3.0	1.5	9.84	9.73	I-D	0.01		17.0	12.8	4.2	O.K
3	19914	19957	BOX CULVERT	1		2.0	2.0	10.36	10.09	I-D	0.01		8.7	7.8	0.9	O.K
3A	20450	20490	PASAGANADO - BC	1		2.0	2.0	12.67	12.44	I-D	0.01		8.7	8.0	0.7	O.K
4	20590	20630	BOX CULVERT	1		2.0	1.5	11.84	11.6	I-D	0.01		5.7	4.5	1.2	O.K
5	20660	20700	BOX CULVERT	1		2.0	2.0	12	11.88	I-D	0.01		8.7	8.4	0.3	O.K
6	21630	21650	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	12.07	11.85	I-D	0.01		4.2	1.4	2.9	O.K
7	21930	21950	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	13.59	13.35	I-D	0.01		4.2	3.7	0.5	O.K
8	22921	22969	BOX CULVERT BOYÉ	2		4.0	2.5	9.57	9.48	I-D	0.01		48.7	35.6	13.1	O.K
9	23010	23045	BOX CULVERT	1		2.0	2.0	10.34	10.16	I-D	0.01		8.7	2.1	6.6	O.K
9A	23140	23170	PASAGANADO - BC	1		2.0	2.0	9.92	9.75	I-D	0.01		8.7	1.3	7.5	O.K
10	23425	23450	BOX CULVERT	1		3.0	1.5	7.32	7.08	I-D	0.01		8.5	7.3	1.2	O.K
11	23880	23898	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	7.75	7.5	I-D	0.01		4.2	1.4	2.8	O.K
11A	24170	24200	PASAGANADO - BC	1		2.0	2.0	9.63	9.39	I-D	0.01		8.7	2.8	5.9	O.K
12	24560	24600	BOX CULVERT	1		3.0	1.5	7.71	7.57	I-D	0.01		8.5	7.6	0.8	O.K
13	24870	24890	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	8.17	7.89	I-D	0.01		4.2	2.4	1.8	O.K
14	25075	25125	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	9.92	9.58	I-D	0.01		4.2	1.4	2.8	O.K
15	25220	25290	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	10.72	10.41	I-D	0.01		4.2	1.0	3.3	O.K
16	25370	25420	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	10.67	10.55	I-D	0.01		4.2	0.8	3.5	O.K
17	25460	25510	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	11.35	11.11	I-D	0.01		4.2	1.4	2.9	O.K
18	25580	25630	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	11.88	11.63	I-D	0.01		4.2	0.5	3.8	O.K
19	25940	25985	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	12.33	12.08	I-D	0.01		4.2	3.7	0.6	O.K
20	26107	26149	PUENTE CAÑO FISTULA													
21	26330	26360	BOX CULVERT	1		1.5	1.5	12.34	12.12	I-D	0.01		4.2	2.1	2.1	O.K
22	26400	26440	ALCANTARILLA	1	0.91			11.39	11.23	I-D	0.01	1.01		0.5	0.5	O.K
23	26530	26570	BOX CULVERT	2		3.0	1.5	11.82	11.73	I-D	0.01		17.0	16.4	0.6	O.K
24	27035	27075	BOX CULVERT	2		4.0	2.0	11.72	11.61	I-D	0.01		34.8	29.3	5.5	O.K
25	27090	27135	BOX CULVERT CALZON QUITAO	2		4.0	2.0	11.17	10.98	I-D	0.01		34.8	27.0	7.8	O.K
27A	27600	27594	PASAGANADO - BC	1		2.0	2.0	11.35	11.56	D-I	0.01		8.7	6.1	2.6	O.K
28	27812	27806	BOX CULVERT CALZON QUITAO	3		2.5	2.5	9.72	10	D-I	0.01		45.7	5.0	40.6	O.K
GLORIETA 1																
1A	25		ALCANTARILLA	1	0.91			10.61		I-D	0.01	1.01		0.00	1.0	O.K
GLORIETA 2																
9B	0		ALCANTARILLA	1	0.91			10.48		I-D	0.01	1.01		0.00	1.0	O.K
GLORIETA 3																
22A	75		ALCANTARILLA	1	0.91			11.10		I-D	0.01	1.01		0.00	1.0	O.K
GLORIETA 4																
26A	113		BOX CULVERT	1		3.0	2.0	10.55		I-D	0.01		13.1	8.2	4.9	O.K
26B	45		BOX CULVERT	1		3.0	2.0	11.32		I-D	0.01		13.1	8.2	4.9	O.K
GLORIETA 5																
29A	72.5		BOX CULVERT	2		2.5	1.0	6.23	6.37	D-I	0.01		7.7	5.3	2.4	O.K
29B	147		BOX CULVERT	2		2.5	1.0	6.23	6.37	D-I	0.01		7.7	5.3	2.4	O.K

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

**CALCULO DE LA CAPACIDAD HIDRAULICA CONECTANTE SUR
CON LA VIA ORIENTAL**

Obra No	Abscisa IZQ	Abscisa DER	Tipo	#	Diam D,m	Luz B,m	Altura H,m	COTAS		SENTIDO	So m/m	Caudal m3/s Box	Caudal m3/s 25 añ	Dif. m3/s	Cond. Actual
								IZQ	DER						
1	K0+120	K0+120	BOX	1		3	1.5	8.38	8.3	D-I	0.01	8.5	7.01	0.49	O.K
2	K0+321	K0+325	BOX	1		3	1.5	8.58	8.5	D-I	0.01	8.5	7.51	1	O.K
3	K0+440	K0+440	BOX	1		3	1.5	8	8.05	D-I	0.01	8.5	8	0.5	O.K
4	K0+480	K0+480	BOX	1		3	1.5	7.6	7.55	D-I	0.01	8.5	8	0.5	O.K
5	K0+534	K0+534	BOX	1		3	1.5	6.87	6.8	D-I	0.01	8.5	8	0.5	O.K
6	K0+790	K0+790	BOX	1		3	1.5	6.89	6.8	D-I	0.01	8.5	7	1.5	O.K
7	K0+840	K0+840	BOX	1		3	1.5	6.86	6.7	D-I	0.01	8.5	8.4	0.1	O.K

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

V.2 Geomorfología hidráulica fluvial

De acuerdo con el Volumen III - Estudio de Geología para Ingeniería y Geotecnia, la Variante Palmar de Varela será construida sobre un relieve ondulado, en zonas de baja recarga sub-superficial, sobre suelos sedimentarios de textura fina a gruesa compuestos en su mayoría por limos, arenas finas a gruesa.

La dinámica fluvial está directamente asociada con el transporte de sedimentos y estabilidad de los taludes de las quebradas por colmatación de los cauces con material vegetal y derrumbes, reduciendo la capacidad hidráulica de las secciones produciendo obstrucciones y elevación del nivel del agua.

Los problemas de dinámica fluvial están relacionados más con los sectores bajos de planicie, por las reducidas pendientes hidráulicas y sección de las corrientes, aunados al alto grado de intervención humana que invaden las rondas hidráulicas favoreciendo la invasión del cauce.

El corredor de la nueva vía se ve afectado por los niveles de inundación del río Magdalena y del Arroyo Caña Fistula.

V.3 Hidráulica de Estructuras Menores (Alcantarillas)

Existen dos formas típicas de escurrimiento en alcantarillas; una supone un escurrimiento con control de entrada y, la otra, un control a la salida.

Para determinar la capacidad hidráulica de una alcantarilla dependiendo del tipo de control se utilizan diferentes factores y formulaciones. Para calcular la capacidad con control a la entrada se requieren los datos de la sección transversal del conducto, la geometría de la embocadura y la profundidad del agua a la entrada o la altura del remanso. Con control a la salida se debe tener en cuenta, adicionalmente, el nivel de agua a la salida, la longitud del conducto, la rugosidad y la pendiente.

Para el caso de las estructuras pequeñas en la variante, se calculó su capacidad a sección llena suponiendo un flujo uniforme con control a la entrada. El control de entrada significa que la capacidad de descarga de una alcantarilla está regida en su entrada por la profundidad del agua (H_e) y por la geometría de la embocadura, que incluye la forma y área de la sección transversal del conducto y el tipo de aristas de la misma.

En el diseño de alcantarillas está demostrado que la profundidad del agua a la entrada es el factor dominante en la determinación de la capacidad de descarga, la cual relega a un segundo plano la rugosidad, la longitud del conducto y las condiciones de la salida. El aumento en la pendiente de una alcantarilla se traduce en la disminución de la profundidad de la lámina de agua a su entrada en una cantidad ínfima, de tal manera que una corrección en la pendiente se puede despreciar.

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

El cálculo de la capacidad en la entrada se realizó con base en la ecuación de un orificio en el fondo, la cual es utilizada en alcantarillas que tienen la entrada sumergida, la salida libre y la pendiente del fondo es mayor de la crítica. Estos colectores funcionan con control a la entrada.

La ecuación para un orificio es:

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2gh}$$

Dónde:

Q, es el caudal que pasa por la tubería en m³/seg.

Cd, es el coeficiente de descarga del orificio, para una entrada con bordes rectos Cd = 0.50.

A, es el área de la sección del conducto en m²

G, es la aceleración de la gravedad de 9.81 m/seg²

H, es la carga de altura con relación al centro del orificio, m

Las secciones con control a la entrada o de flujo crítico en la boquilla se evaluaron mediante el nomograma elaborado por el MOPT en el año de 1985; en las FIGURAS V-1 y V-2, se presentan los nomogramas para tubos circulares y cajones con control en la entrada.

El dimensionamiento de las estructuras se presenta en el CUADRO V-1 basados en el caudal hidrológico de los CUADROS IV-7 y IV-8.

Se deja constancia que las alcantarillas fueron diseñadas para el control a la entrada, si el río Magdalena sube a niveles máximos puede controlar el descole de las obras de drenaje, viajando el río en dirección de la llanura y temporalmente las obras serán insuficientes. Cuando bajen los niveles de control del río, podrán funcionar sin problemas de control a la salida.

V.4 Hidráulica de Estructuras Mayores

La vía cruza el Arroyo Caña Fistula en el K26+107 con un Puente de 30.0 m.; a continuación se describe el cruce.

V.4.1 Características del cauce del Arroyo Caña Fístula

El Arroyo Caño Fistula ha desarrollado un cauce de 16 m de ancho con una profundidad de 3,0 m, con pendiente transversal suave en ambas márgenes. El flujo desciende con velocidades bajas, observándose un lecho estable en grava y arena, bien conformado en su talud.

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

Como se observa en las FOTOGRAFÍAS V-1 y V-2, el lecho del arroyo está conformado con gravas y arenas redondeadas, el arroyo en esta zona no tiene capacidad de arrastre y socavación, sino de depositación, lo que no genera amenaza de arrastre de material vegetal, palos, etc.

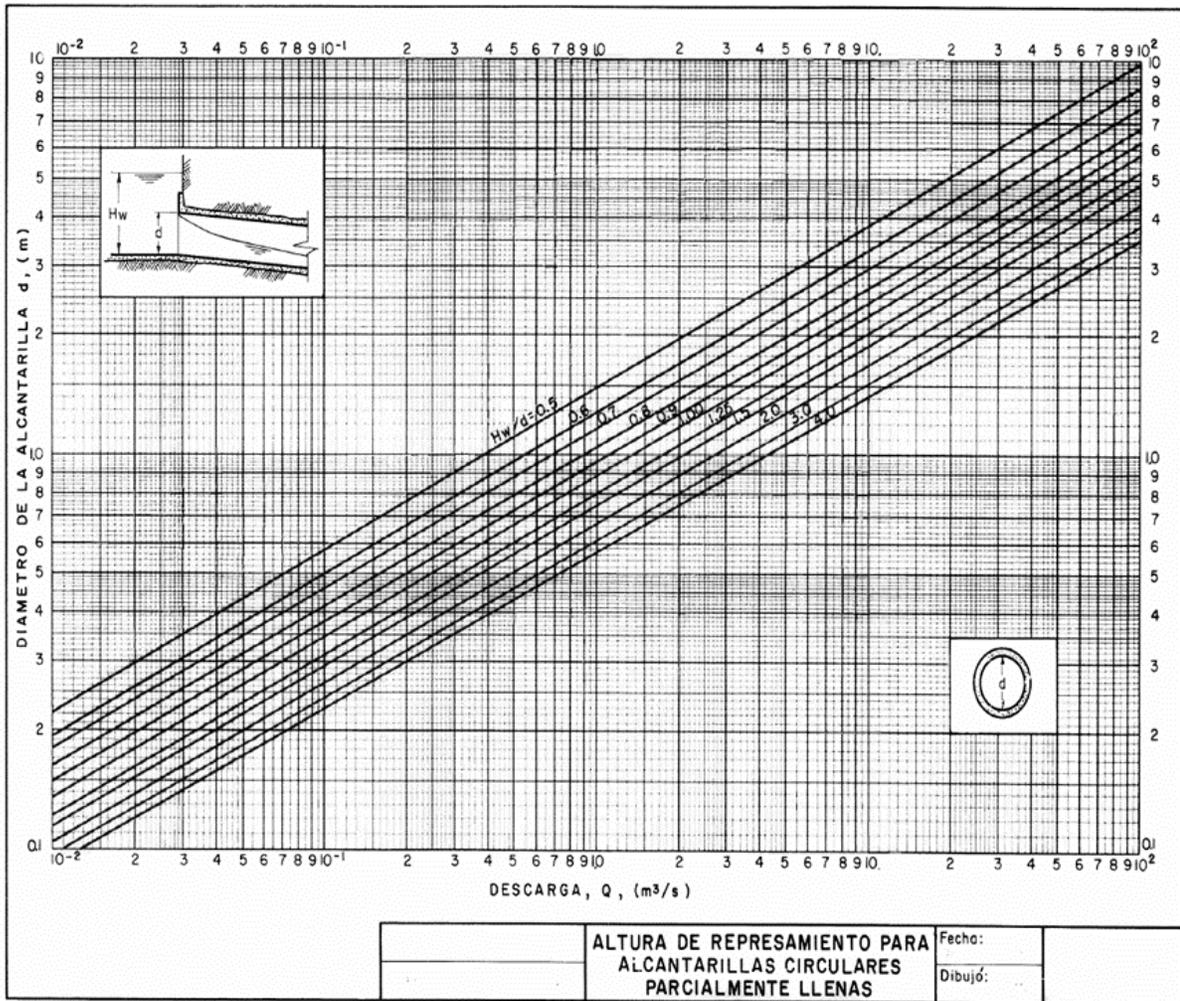
FOTOGRAFÍA V-1. LECHO DEL ARROYO CAÑA FÍSTULA



FOTOGRAFÍA V-2. VISTA DEL ARROYO CAÑA FÍSTULA EN EL CRUCE CON LA ORIENTAL



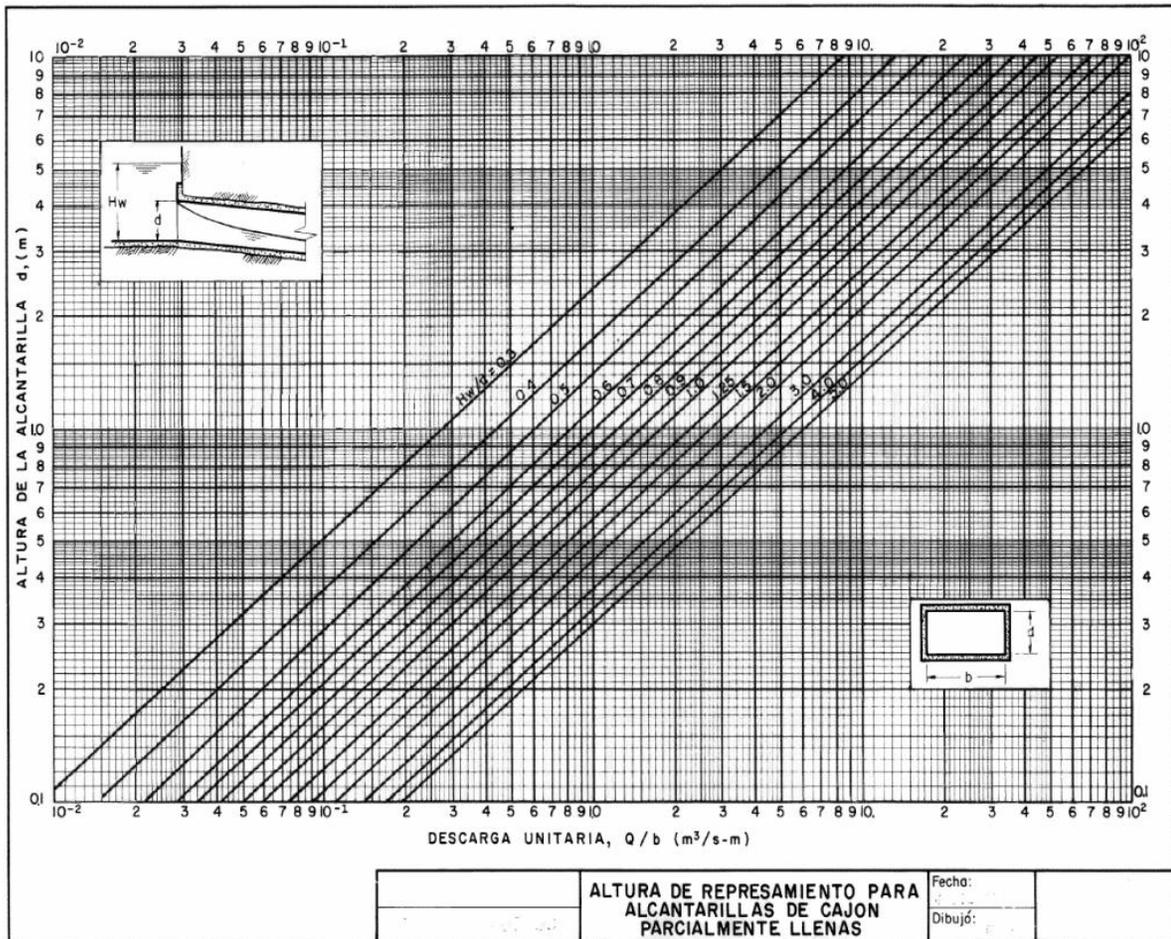
FIGURA V-1. NOMOGRAMA DEL MOPT PARA TUBOS CIRCULARES CON CONTROL A LA ENTRADA



TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

FIGURA V-2. NOMOGRAMA DEL MOPT PARA CAJONES CON CONTROL A LA ENTRADA



V.4.2 Hidráulica de la sección transversal

El cálculo de la calibración de las secciones transversales se realizó según la metodología de Thorne y Zevenbergen¹, que fue desarrollada especialmente para ríos de montaña con cauce aluvial, utilizando las ecuaciones de Darcy-Weisbach, permitiendo calcular la velocidad media en el río. Adicionalmente se calculó el número de Mannig como medio de control de la calibración.

Las principales ecuaciones utilizadas en la calibración se presentan a continuación:

¹ Thorne Colin R, and Zevenbergen Lyle W. Estimating Mean Velocity in Mountain Rivers, Journal of Hydraulic Engineering, April 1985, pg. 612-623.

$$\frac{U}{(g \times R \times S)^{0.5}} = 5.62 \log \frac{d \times R}{3.5 \times D_{84}} = \left[\frac{8}{f} \right]^{0.5}$$

$$a' = 11.1 \times \left(\frac{R}{d_o} \right)^{-0.314}$$

Donde

U = Velocidad media en la sección transversal en m/seg.

g = Aceleración debida a la gravedad en m/seg²

R = Radio hidráulico de la sección

S = Pendiente hidráulica del fondo del río

a' = Factor de cálculo de rugosidad de Thorne and Zevenbergen

D₈₄ = Diámetro 84 del material del lecho en m.

f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach

do = Altura máxima de variación de niveles del río, m.

Para el Arroyo Caña Fistula su cauce natural solo maneja la creciente de 5 años, por lo que se presentan inundaciones en su entorno. En el CUADRO V-2 se presenta la Calibración de Arroyo Caña Fistula. En el CUADRO V-3, se presenta la Calibración hidráulica del Arroyo Boye.

CUADRO V-2. CALIBRACIÓN TEÓRICA SECCIÓN ARROYO CAÑA FISTULA

PARÁMETROS HIDRÁULICOS ARROYO CANA FISTULA													
Nivel	Anchura	Ymax.	Radio	Pendiente	Área	D ₈₄	a'	V ^{*1}	Q ^{*1}	f ^{*1}	n ^{*2}	V ^{*2}	Q ^{*2}
m	m	m	hid.	m/m	m ²	m		m/s	m ³ /s			m/s	m ³ /s
7.40	3.75	0.00						0	0				
8.00	6.5	0.60	0.433	0.0020	3.1	0.05	12.30	0.77	2	0.115	0.033	0.77	2
9.00	8.75	1.60	1.034	0.0020	10.7	0.05	12.73	1.50	16	0.072	0.030	1.50	16
10.00	11	2.60	1.513	0.0020	20.6	0.05	13.16	1.99	41	0.060	0.030	1.99	41
11.00	14.25	3.60	1.860	0.0020	33.2	0.05	13.66	2.32	77	0.054	0.029	2.32	77
12.00	30	4.60	1.353	0.0020	60.3	0.05	16.30	1.92	116	0.057	0.028	1.92	116
13.00	30	5.60	1.525	0.0020	115.3	0.05	16.70	2.10	243	0.054	0.028	2.10	242

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

CUADRO V-3. CALIBRACIÓN TEÓRICA SECCIÓN DEL BOX ARROYO BOYE

PARÁMETROS HIDRÁULICOS ARROYO BOYE													
Nivel	Anchura	Ymax.	Radio	Pendiente	Área	D ₈₄	a'	V ¹	Q ¹	f ¹	n ^{*2}	V ^{*2}	Q ^{*2}
m	m	m	hid.	m/m	m ²	m		m/s	m ³ /s			m/s	m ³ /s
4.50	0.84	0.00						0	0				
5.00	2.61	0.50	0.277	0.005	0.9	0.05	13.36	0.87	1	0.144	0.035	0.87	1
6.00	14	1.50	0.586	0.005	9.7	0.05	14.91	1.62	16	0.088	0.031	1.62	16
9.30	14	1.83	1.410	0.005	24.7	0.05	13.29	1.75	35.6	0.061	0.030	1.75	35.6

A continuación se presentan el resumen de datos de diseño para el Arroyo Caño Fistula y para el Arroyo Caño Boye, calculados para los periodos de retorno de 50 y 25 años, respectivamente.

Cuenca	Arroyo Boye	Arroyo Caña Fistula
Periodo de Retorno (años)	25	50
Caudal (m³/s)	35.6	215
Nivel Máximo (msnm)	8.93	11.95
Estructura de Cruce	Box 4x2.5 m (2 celdas)	Puente L=30.0 m.

A continuación se presentan los caudales hidráulicos para el Arroyo Caña Fistula y para el Arroyo Caño Boye, calculados par diferentes periodo de retorno.

Tr	Arroyo Caña Fistula Puente L=30.0 m.	Hmax (msnm)	Arroyo Boye Box 4x2.5 m (2 celdas)	Hmax (msnm)
	Caudal (m3/s)		Caudal (m3/s)	
5	109	10.73	15	8.38
10	139	11.04	22.5	8.60
25	182	11.45	35.6	8.93
50	215	11.95	48.8	9.23

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

V.5 Hidráulica de Cunetas

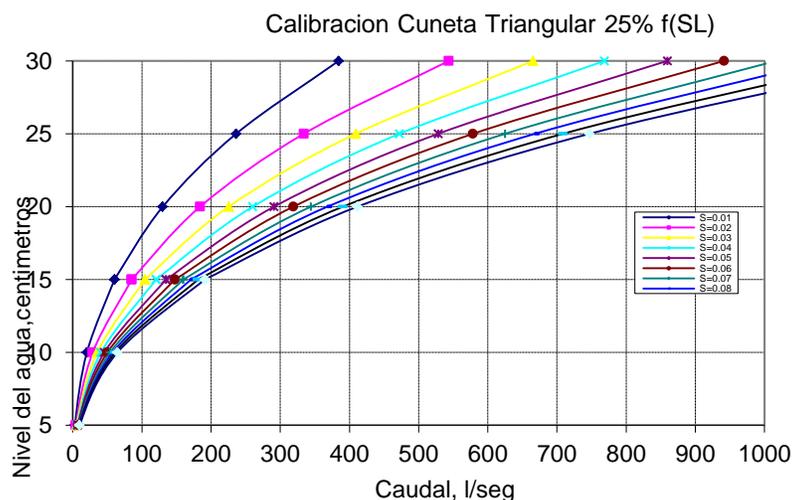
El estudio hidráulico del drenaje superficial de la vía se focalizó en los sectores de corte que requieren cunetas, las cuales se relacionan en el CUADRO V-6; una vez realizada esta labor se procedió a proyectarlas con base en las lluvias obtenidas de los resultados del estudio hidrológico.

En la zona donde la vía vaya en terraplén, por encima del nivel del terreno, no se colocará cuneta, sin embargo, para garantizar la evacuación de agua en las intersecciones y retornos es importante la construcción de éstas en dichos puntos, para lo cual se recomienda un diseño de cuneta triangular en concreto, con pendiente transversal de fondo 4:1 ($St=22,5\%$) y del talud $\frac{1}{4}:1$, altura de 0.30 metros, ancho en la base de 1.20 metros y espesor de concreto 0,15 metros.

Para el diseño hidráulico de la cuneta se estimó el área de drenaje asumiendo una anchura aferente de 10 metros, una pendiente longitudinal paralela a la rasante de la vía, un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.015 y una condición de flujo uniforme.

En los planos de planta – perfil se indica la localización de las cunetas de las intersecciones y zonas de retornos, mientras que en los planos de detalles el esquema de la cuneta. En la FIGURA V-3 se presenta la curva de capacidad hidráulica de la cuneta para pendiente transversal $St = 25 \%$, $L = 1,2 \text{ m}$.

FIGURA V-3. CURVA DE DESCARGA CUNETA
 $St = 25\%$, $B = 1.2 \text{ m}$, $H = 0.30 \text{ m}$



TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

V.6 Hidráulica para rápidas escalonadas

Durante construcci3n se determinaran los sitios donde se requiera la construcci3n de rápidas escalonadas en sus descoles; en la FIGURA V-4 se presenta el esquema de los escalones a construir.

La rápida escalonada permite la conducci3n del agua desde un nivel superior a otro inferior, manteniendo la energía cinética constante. Los criterios que predominan en su diseño son:

- La altura entre escalones debe ser limitada, teniendo en cuenta la acci3n dinámica del flujo y avance del chorro en el escal3n.
- La longitud de cada escal3n debe permitir la formaci3n de resalto hidráulico
- En cada escal3n se debe producir el ahogamiento del resalto hidráulico, como control sobre el nivel del agua y su velocidad.
- El diseño de cada rápida escalonada es funci3n de su topografía y del caudal que maneje la cañada y será un diseño específico para cada una.

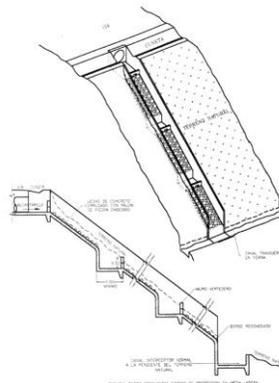
En la vía es necesario la construcci3n de rápidas escalonadas, cunetas y canales que controlen la erosi3n aguas abajo de la estructura, así mismo, para evitar las fuertes velocidades de las corrientes. En los planos de secciones transversales se detallan las obras de drenaje y obras complementarias.

V.7 Subdrenes

La vía no corre en media ladera, por lo tanto la construcci3n de subdrenes solo es necesaria donde hay suelos saturados o infiltraciones que pueden comprometer la estabilidad de la banca.

En el presente diseño no se necesita la instalaci3n de geodrenes a lo largo de la vía, en la zona en contacto con el talud interno que presenta afloramiento y escurrimiento superficial del agua.

FIGURA V-4. ESQUEMA DE RÁPIDAS ESCALONADAS



TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavaci3n

CAPITULO VI

VI. ESTUDIO DE SOCAVACIÓN

Para adecuar y mejorar el drenaje de una vía se requiere no solo verificar que las crecientes de diseño puedan transitar holgadamente a través de las estructuras existentes y proyectadas, sino también se debe garantizar la estabilidad de las estructuras de drenaje respecto a los procesos erosivos que sufre el cauce después de las crecidas.

A continuación se presenta el análisis de la información de campo en los aspectos de sedimentología, topografía e hidráulica; se da a conocer la metodología empleada para calcular la socavación en el puente Arroyo Caña Fistula y finalmente se dan a conocer las observaciones y recomendaciones correspondientes.

VI.1 Aplicación de las teorías de socavación general

La socavación general del cauce fue calculada por el método propuesto por Lischtván-Levediev². El método se basa en determinar la condición de equilibrio entre la velocidad media del arroyo y la velocidad media que éste necesita para erosionar un material de diámetro y densidad conocido.

La condición de equilibrio se establece de la siguiente manera:

$$U_e = U_r$$

Dónde: U_e = Velocidad media que debe tener la corriente para erosionar el material del fondo (inicio de arrastre) en m/seg.

U_r = Velocidad media real de la corriente en m/seg.

a) Cálculo de U_r :

La hipótesis básica: el caudal unitario que pasa por cualquier franja de la sección permanece constante durante el proceso de erosión.

Para cualquier profundidad, U_r se calcula con la fórmula siguiente:

$$\alpha = \frac{Q_d}{m \times B_e \times d_m^{5/3}}$$

² Levediev, V.V. " Hidrologia i gidraulica v mostovom i poroshonom strailtiesvie, gidro-meteorologischeskoie Isdstelbstvo, Leningrad,1959, chapters 6 and 7

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,

Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel

Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

α = Coeficiente para calcular la velocidad media y es función de la geometría de la sección del río.

d_m = Profundidad media de la sección en m

d_o = Altura, entre el nivel del agua al pasar la creciente y el nivel del fondo, en m.

d_s = Profundidad de socavación medida desde el nivel del agua al pasar la avenida hasta el nivel del fondo erosionado.

Q_d = Caudal máximo de diseño en m^3/s

B_e = Anchura efectiva de la sección, en m

m = Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de contracción lateral del flujo por los estribos del puente.

b) cálculo de U_e

Maza³ propone la siguiente ecuación:

$$U_e = 4.7\beta D_{84}^{0.28} d_s^{0.223/D_{84}^{0.092}} \quad \text{Si } 0.0028 \leq D_{84} \leq 0.182$$

Donde: $\beta = 0.8416 + 0.03342 \ln T$

T = Período de retorno en años

D_{84} = Diámetro de la muestra del lecho en la cual el 84 % en peso es menor que ese tamaño (0,01 m). El D_{84} corresponde aproximadamente al diámetro medio de la coraza para distribuciones logarítmicas normales o normal de los tamaños de las partículas.

La ecuación de cálculo de la socavación general es la siguiente:

$$d_s = \left(\frac{ad_o^{5/3}}{4.7\beta D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{d_{84}^{0.092}}{0.223 + D_{84}^{0.092}}}$$

Se debe tener en cuenta que las fórmulas anteriormente escritas, según la teoría de Maza (Ref. 4) son las que se aplican para suelos granulares no cohesivos, como es el caso del material de lecho del arroyo Caña Fistula.

³ Maza Álvarez, José Antonio, " Manual de ingeniería de Ríos", Capítulo 6: "Estabilidad de Cauces", Instituto de Ingeniería UNAM, México, Septiembre de 1989

En el CUADRO VI-1, se muestra el cálculo de la socavación general para el cauce del arroyo Caña Fistula, con una socavación general de 1,8 m.

VI.2 Aplicación de las teorías de socavación lateral en estribos

Se presenta el cálculo de la socavación lateral para los estribos del puente, utilizando los métodos de Froenlich, Highways in the river Environment (HIRE), Artamanof y la ecuación modificada de Laursen año 1960.

Las ecuaciones de socavación lateral en estribos se presentan a continuación:

Método de Froenlich (referencia 9)

$$\frac{Y_s}{Y_a} = 2.27 \times K_1 \times K_2 \times \left(\frac{a}{Y_a}\right)^{0.43} \times F^{0.61} + 1$$

Método de Artamanof (referencia 9)

$$Y_s = K\alpha * K\kappa * K\varphi * Y_a \quad \square$$

Método de la ecuación modificada de Laursen 1960 (referencia 9)

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{6/7} * \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^{K1}$$

CUADRO VI-1. CALCULO DE SOCAVACIÓN GENERAL EN LA SECCIÓN ARROYO CAÑA FISTULA

Se utiliza la metodología de Maza para suelos granulares, aplicando las fórmulas		
de la Ref.4 , correspondientes al rango del D_{84} en que se encuentra el material		
del fondo de la sección de proyecto:		
El diámetro del material del lecho en el sitio de cruce se encuentra en el siguiente		
rango:		
$0,0028 < D_{84} < 0,182 \text{ m} :$		
Los parámetros de entrada para el cálculo de socavación son los siguientes:		
T = Período de retorno considerado para el proyecto	100	años
Qd = Caudal de diseño	250	m^3/s
μ = Coeficiente de contracción	0.97	

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

Be = Anchura efectiva de la superficie de agua	30	m
A = Area hidráulica	64	m ²
V = velocidad del flujo en la sección	3.91	m/s
dm = A/Be = Profundidad media de la corriente	2.13	m
H nivel mínimo de estiaje	11.00	msnm
H nivel máximo de creciente	13.00	msnm
do = Diferencia de profundidades entre niveles máximos y mínimos	2.00	m
$\beta = 0.8416 + 0.03342 \cdot \ln T$	1.00	
D ₈₄ = Diám. del sedimento que pasa en un 84% en peso la muestra	0.01	m
$\alpha = Qd / (\mu \cdot Be \cdot (dm)^{5/3}) =$ Coef. para calcular la velocidad media	2.43	
La profundidad de socavación ds se calcula con la siguiente fórmula:		
$ds = ((\alpha \cdot do^{5/3}) / (4.7 \cdot \beta \cdot D_{84}^{.28}))^{(D_{84}^{.092}) / (.223 + D_{84}^{.092})}$		
ds=	3.80	m
Socavación esperada por debajo del nivel del lecho actual:	1.80	m

Para la socavación lateral en los estribos del puente Arroyo Caña Fistula se tienen variaciones entre 2,86 a 3,70 m, con un valor promedio de 3.36 m, ver CUADRO VI-3.

CUADRO VI-2. CÁLCULO DE SOCACACIÓN LATERAL EN LOS ESTRIBOS ARROYO CAÑA FISTULA 100 AÑOS

Ya = profundidad promedia del flujo en la planicie de inundación	1.00	m
Y1 = profundidad del flujo junto al estribo	2.89	m
Qe = Caudal obstruido por el estribo y el terraplen	50	m ³ /s
Ve = velocidad del flujo en la planicie obstruida	1.57	m/s
V = velocidad del flujo en el estribo	3.09	m/s
Forma del estribo	vertical	
L = largo del estribo en el sentido del flujo	7	m
a = ancho del estribo en la planicie obstruida	35	m
relación a/Ya	35.00	
Método de Froehlich		
$Ys/Ya = (2,27 \cdot K1 \cdot K2 \cdot (a/Ya)^{0,43} \cdot F^{0,61} + 1)$		
K1	Estribo vertical	FHA pg 11-6
		1

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela, Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

θ	Angulo de aproximacion en grados	15	
K2	Coeficiente del relleno de aproximacion y la corriente	0.79	
F	Numero de Froude	0.50	
	$Y_s=(2,27*K1*K2*(a/Ya)^{0,43}*F^{0,61}+1)*Ya$	6.44	m
Y_L	Socavación local lateral	3.54	m
Método del Highways in the river Environment (HIRE)			
Para $a/Y1 > 25$			
		12.10	NO APLICA
	$Y_s/Y1=4*F^{0,33}*(K1/0,55)$		
K1	FHA 11-6	1	
F	Numero de Froude	0.58	
	$Y_s=4*F^{0,33}*(K1/0,55)*Y1$	9.66	m
Y_L	Socavación local lateral	6.77	m
Método de Artamanof			
	$Y_s=K1*K2*K3*Y1$		
α	Angulo de aproximacion en grados	MAZA pg 30	15
k	Distancia horizontal en m		0
Q1	Caudal que podria pasar por el area ocupada	50	m ³ /s
K1	Coeficiente que depende del angulo alfa	0.82	
K2	Coeficiente que depende del talud	1.03	
K3	Coeficiente que depende del caudal obstruido	2.72	
	$Y_s=K1*K2*K3*Y1$	6.59	m
Y_L	Socavación local lateral	3.70	m
SOCAVACION POR CONTRACCION			
ECUACION MODIFICADA DE LAURSEN 1960			
Si $V_c > V$ socavacion por agua clara			
Si $V_c < V$ socavacion con lecho movil activo			
	$V_c=10,95*Y1^{1/6}*d_{50}^{1/3}$	FHA 9-13	2.11 m/s
V	Velocidad cercana al estribo	3.09	m/s
Socavacion por lecho movil activo $V > V_c$			
	$Y2/Y1=(Q2/Q1)^{0,857}*(W1/W2)^{k1}$		
Q1	Caudal total en el canal	250	m ³ /s

TC-2082-135

Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela, Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

Q2	Caudal seccion del puente	200	m ³ /s
W1	Canal sin contraccion	100	m
W2	Canal con contraccion	28	m
k1	Exponente funcion del modo de transporte	0.69	
Y2		5.75	
Y _L =Y2-Y1		2.86	m
Socavacion en agua clara Vc>V			
Q	Caudal en la zona lateral de inundación	50	m ³ /s
W	Distancia entre el borde del canal y el estribo	10	m
Dm	Diametro efectivo del material del lecho 1,25*D ₅₀	0.005	m
Y2=(Q ² /(120*Dm ^{0,67} *W ²)) ^{3/7}		3.86	m
Y _L =Y2-Y1		0.97	m

CAPITULO VII

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La información meteorológica básica utilizada en el presente estudio se considera confiable, consistente y suficiente en cuanto al tipo de información y a la extensión de los períodos de medición, siendo representativa de la zona de estudio.
- La distribución temporal de la lluvia en el sector tiene una tendencia monomodal, la cual presenta un período de pocas lluvias de diciembre a marzo, siendo los meses de enero y febrero los meses de más baja precipitación. El período húmedo transcurre de abril a noviembre, siendo los meses de agosto a octubre, los de mayor pluviosidad.
- La rasante de la vía en los alrededores del Arroyo Caña Fístula deberá estar por encima de la elevación 11,95 msnm, para evitar inundaciones periódicas de la calzada.
- La rasante de la vía en los alrededores de Arroyo Boye deberá estar por encima de la elevación 8.93 msnm, para evitar inundaciones periódicas de la calzada.
- Para el Arroyo Caña Fístula se recomienda la construcción de un Puente de L=30.0 m.
- Para el Arroyo Boye se recomienda la construcción de un Box culvert doble de 4x2.5 m.
- La buena operación del sistema de drenaje será función del mantenimiento periódico a realizar después de cada período de invierno; de lo contrario ninguna obra de drenaje vial será funcional, por lo que el operador de la vía deberá hacer seguimiento y mantenimiento de todas las estructuras hidráulicas proyectadas en el presente informe de diseño.

CAPITULO VIII

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays, Hidrología Aplicada, Mc-Graw Hill, 1994, Versión Español.

Bureau of Reclamation, Diseño de presas pequeñas, editorial Continental, 1982

Gráficos hidráulicos para diseño de alcantarillas, Report No TPI-43-74-01. Department of Transportation, Washington, D.C.

Maza Alvarez, José Antonio, XV Congreso en hidráulica de ríos, Curso de precongreso, Universidad del Norte, Barranquilla, septiembre de 1992

Ven Te Chow, Open- Channel Hydraulics, Mc Graw- Hill, 1959.

Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, Mc Graw Hill, Julio 1964.

Maza Alvarez, José Antonio; García Flores, Manuel; Manual de Ingeniería de Ríos, capítulo 13, Erosión en ríos y obras de protección, junio de 1989.

Maza Alvarez, José Antonio, Contribución al estudio de la socavación local en pilas de puente, Universidad Nacional Autónoma de México, enero 1964

Instituto Panamericano de Carreteras y Federal Highway Administration, Estabilidad de Cauces y Socavación en Puentes, Universidad del Rosario, Argentina, abril de 1996.

Departamento Nacional de Planeación, Estudio Nacional de Aguas, 1988.

HIMAT, Estudio Piloto de Control de Inundaciones, 1990.

SIPUCOL, INV, Apéndice F, Socavación y Protección contra Socavación, 1996.

JUAREZ, BADILLO, Mecánica de Suelos tomo III, Apéndice III, Socavación, 1996

RODRIGO VARGAS Y MARIO DIAZ-GRANADOS, Curvas Sintéticas de Regionalización de intensidad-duración-frecuencia para Colombia. Año 2000.

ANEXO No.1
PLANCHAS IGAC

TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

A N E X O No.2
REGISTRO FOTOGRÁFICO

TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

**FOTOGRAFÍAS 1 Y 2. PANORÁMICA DE LA CUENCA CERCANA A
SABANAGRANDE, CANTERAS DE ARENA**



TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

**FOTOGRAFÍAS 3 Y 4. ARROYO CAÑA FÍSTULA, SECTOR DEL PUENTE DE CRUCE
A LA VARIANTE**

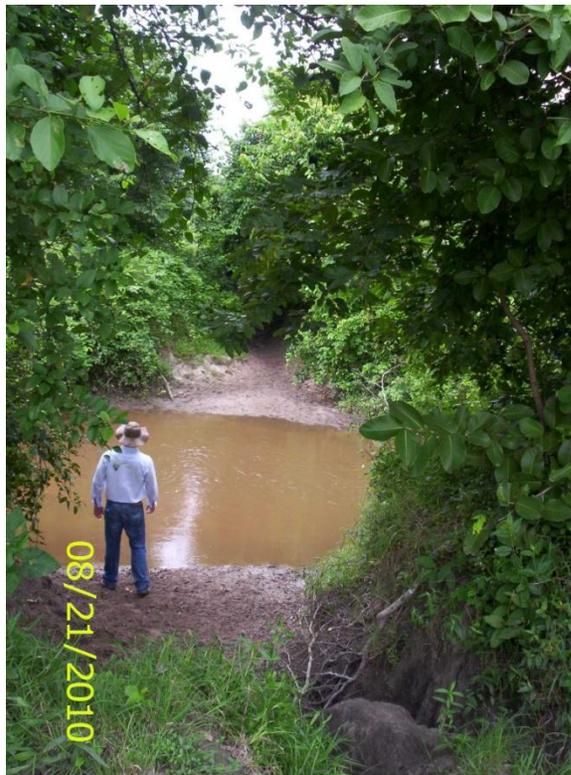


TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación

FOTOGRAFÍA 5. ZONA DE EXPLOTACIÓN DE ARENAS



FOTOGRAFÍA 7. PANORÁMICA DEL LECHO DEL ARROYO CAÑA FÍSTULA



A N E X O No.3 ÁREAS DE DRENAJE

TC-2082-135
Estudios y Diseños de la doble calzada de la Variante de Palmar de Varela,
Incluyendo el diseño de cinco (5) Intersecciones a nivel
Estudio de Hidrología, Hidráulica y Socavación