



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
HIDRÁULICO DEL VERTEDOR
DE SALIDA DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE**

**T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A
EDUARDO AARÓN FUENTES SILVA**

DIRECTOR DE TESIS: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres y hermanos por ser los pilares de mis logros.

A Isabel por la paciencia que tuvo en la revisión de este trabajo, así como de apoyarme en momentos donde todo parecía oscuro.

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez, por guiarme en la realización de este trabajo y por brindarme su amistad y confianza.

Al Instituto de Ingeniería UNAM, por las facilidades otorgadas en el uso de sus instalaciones.

Y por último, y sin dejar de ser importante a Dios, porque en este trayecto de vida me permitió estar rodeado por personas que siempre me apoyaron y creyeron en mí.

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL
VERTEDOR DE SALIDA DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE**

Índice

Introducción

1 Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

- 1.1 Antecedentes 1
- 1.2 Sistema de Drenaje Profundo 9

2. Túnel Emisor Central

- 2.1 Obra Derivadora de la Descarga del Túnel Emisor Central 16

3. Túnel Emisor Oriente

- 3.1 Descripción General del Túnel Emisor Oriente 21
- 3.2 Obra de Derivación del Túnel Emisor Oriente 23
- 3.3 Descripción General de cada uno de los Elementos que Componen la Obra de Derivación 25

4. Ecuaciones Fundamentales para el Cálculo de Perfiles Hidráulicos

- 4.1 Calculo del Flujo Uniforme 28
- 4.2 Cálculo de las Condiciones Críticas 30
- 4.3 Cálculo del Perfil del Flujo en Canales 32
- 4.4 Método Directo por Pasos 33

5. Revisión Hidráulica de la Obra Derivadora del Túnel Emisor Oriente 35

6. Conclusiones 41

Bibliografía 42

Apéndice A 44

Apéndice B 48

Apéndice C 50

Apéndice D 51

Introducción

La zona Metropolitana del Valle de México se encuentra situada sobre una cuenca cerrada, la cual formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco.

En época de lluvias, estos lagos se convertían en uno solo de dos mil kilómetros cuadrados de superficie y con ello, venían las inundaciones periódicas que desde la fundación de Tenochtitlan han enfrentado sus habitantes.

Con estos problemas ha surgido la necesidad de construir importantes obras de drenaje para el control y desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, como por ejemplo:

- El Albarradón de Nezahualcóyotl (1449)
- El Tajo de Nochistongo (1789)
- El Gran Canal del Desagüe (1900)
- Drenaje Profundo (1975)

En el año de 1975 la población era de 10 millones de habitantes y el Emisor del Poniente que descarga por el Río Cuautitlán y el Tajo de Nochistongo y el Emisor Central como columna vertebral del Sistema de Drenaje Profundo, podían desalojar hasta 280 m³/s.

En la actualidad, cuando la población prácticamente se ha duplicado, dicha capacidad se ha reducido y por este motivo es necesario: rehabilitar y mantener las obras existentes así como realizar nuevas obras; es por eso que en esta tesis, se plantea y analiza una solución, la cual consiste en construir un nuevo emisor que llevará por nombre Túnel Emisor Oriente (TEO). Esta obra permitirá un mayor desalojo de agua ayudando a prevenir posibles inundaciones en el Valle de México.

La revisión presentada en esta tesis está sustentada por una serie de cálculos basados en ecuaciones fundamentales de hidráulica, las cuales permiten conocer y analizar el posible comportamiento y funcionamiento de dicha obra.

La primera descripción que se conoce del Valle de México, es la que hace Hernán Cortés en su segunda Carta de relación¹:

“ La cual dicha provincia es redonda y está toda cercada de muy altas y ásperas sierras, y lo llano de ella tendrá en torno hasta setenta leguas², y en el dicho llano hay dos lagunas que casi ocupan todo, porque tienen canoas en torno más de cincuenta leguas. Y la una de estas dos lagunas es de agua dulce, y la otra, que es mayor, es de agua salada.

Divídelas por una parte una cuadrillera pequeña de cerros muy altos que están en medio de esta llanura, y al cabo se van a juntar las dichas lagunas en un estrecho de llano que entre estos cerros y las sierras altas se hace. El cual estrecho tendrá un tiro de ballestas, y por entre una laguna y la otra, y las ciudades y otras poblaciones que están en las dichas lagunas, contratan las unas con las otras en sus canoas por el agua, sin haber necesidad de ir por la tierra. Y porque esta laguna salada grande crece y mengua por sus mareas según hace la mar todas las crecientes, corre el agua de ella a la otra dulce tan recio como si fuese caudaloso río, y por consiguiente a las menguantes va la dulce a la salada.”

Se sabe que desde su fundación en 1325, Tenochtitlan (Fig. 1.2 y 1.3) fue afectada por inundaciones periódicas a causa de las lluvias.

¹ Hernán Cortés. Cartas y documentos. México, Porrúa 1963.

² La legua es una antigua unidad de longitud que expresa la distancia que una persona o un caballo puede andar en una hora, varía entre 4 y 7 Km.

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México



Fig. 1.2 Tenochtitlan

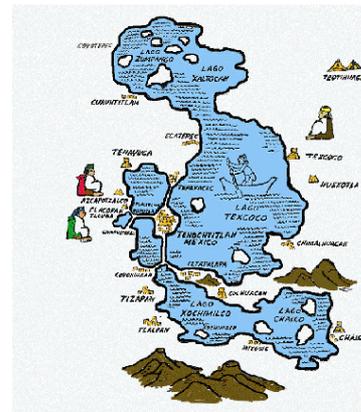


Fig. 1.3 Valle de México
Época Prehispánica

En el año 1449 México-Tenochtitlan gobernada por Moctezuma Ilhuicamina, sufrió los efectos de su primera gran inundación, éste pidió consejo al rey de Texcoco Nezahualcóyotl, quien propuso y construyó un albarradón de 16 Km de longitud que se extendía desde el cerro de la estrella en Iztapalapa hasta Atzacualco pasando por el Cerro del Peñón (Fig. 1.4).

Con esta obra se protegía a la población de las aguas procedentes del norte de la cuenca y que escurrían hacia el lago de Texcoco, en aquel entonces el lugar más bajo del valle; además este albarradón servía para separar la laguna de México, constituida por agua dulce, de las aguas salobres del lago de Texcoco.

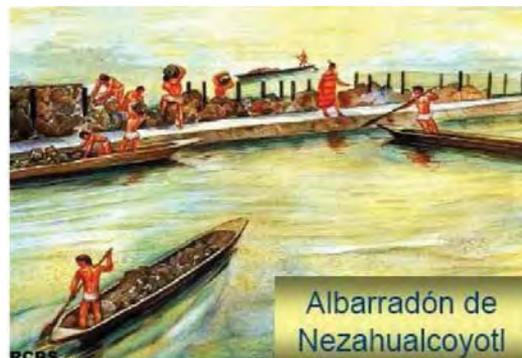


Fig. 1.4 Albarradón de Nezahualcóyotl

En 1604 y 1607, grandes inundaciones de la Ciudad de México motivaron a la búsqueda de una solución para evitarlas, la cual consistió en abrir la cuenca natural cerrada del Valle de México y así dar salida a las aguas excedentes mediante un túnel llamado Nochistongo (que luego se convirtió en tajo) al noroeste de la cuenca, por el cual fueron desviadas las aguas del río Cuautitlán. Este proyecto fue realizado por el astrónomo, astrólogo, geógrafo, médico, ingeniero, arquitecto, escritor y cosmógrafo Enrico Martínez.

A los pocos meses de su funcionamiento, el túnel tuvo derrumbes por la falta de revestimiento, y fue hasta el año de 1789 en que la obra se convirtió en tajo, a través de 160 años de trabajo, se terminó y dio salida permanente al río Cuautitlán (Fig. 1.5).



Fig. 1.5 Tajo de Nochistongo

Para el año de 1856, se lanzó una convocatoria a los especialistas nacionales y extranjeros, para presentar un proyecto integral de obras hidráulicas de la cuenca de México, ofreciéndose un premio de doce mil pesos.

El proyecto más completo fue el del ingeniero Francisco de Garay, el cual consistía en construir el Gran Canal del Desagüe (Fig. 1.6) y el túnel de Tequisquiác (Fig. 1.7), terminándose en Marzo de 1900, siendo una segunda salida de las aguas de la cuenca.



Fig. 1.6 Gran canal del Desagüe

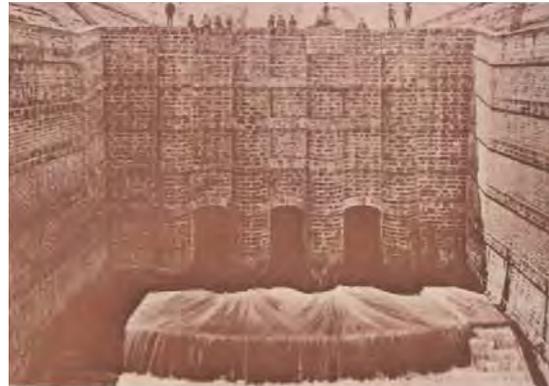


Fig. 1.7 Compuerta del Túnel
Tequisquiac (cara posterior)

En aquellas épocas, todas las obras de desagüe se proyectaron para trabajar por gravedad, sin embargo, con el crecimiento explosivo de la mancha urbana y con ello de la población (Fig. 1.8), los suministros de agua potable se fueron agotando y en su lugar se incorporaron nuevas fuentes de abastecimiento, entre las cuales, está el bombear agua de los acuíferos, lo cual ocasiona un desequilibrio en las presiones del agua sobre el subsuelo y con ello, el material arcilloso fácilmente compresible inició un proceso de consolidación, lo que se traduce en un hundimiento general del Valle de México, ocasionando que las obras trabajen a contrapendiente (Fig. 1.9). Los cambios de pendiente del Gran Canal y de otros drenes, hicieron disminuir la capacidad de desalojo del sistema y fueron en gran parte los causantes de las grandes inundaciones, esto obligó a construir un sistema de colectores y plantas de bombeo para descargar las aguas negras y pluviales (Fig. 1.10), pero una urbe tan grande y compleja como la Ciudad de México, no podía depender de un sistema de drenaje cuya operación resultaba excesivamente complicada, sujeta a cortes de energía eléctrica y poco confiable.

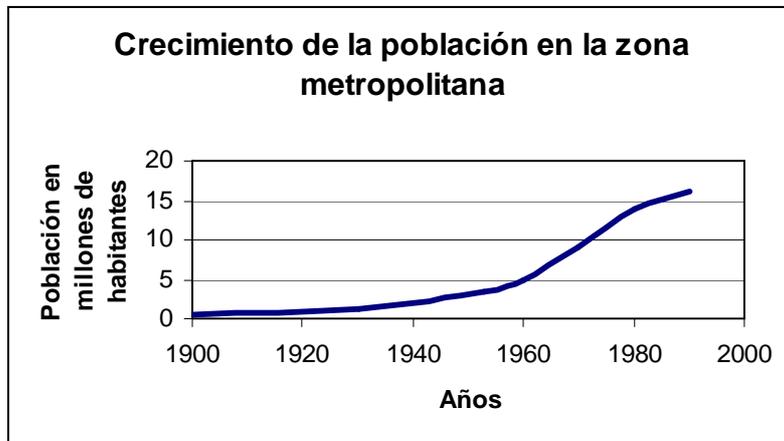


Fig. 1.8 Crecimiento de la población



Fig. 1.9 Hundimiento de la Ciudad de México



Fig. 1.10 Planta de Bombeo

A raíz de estos problemas, la Dirección General de Obras Hidráulicas del Departamento del Distrito Federal formuló el “Plan General para Resolver los Problemas del Hundimiento, las Inundaciones y el Abastecimiento de Agua Potable de la Ciudad de México”, dicho plan plantea la conveniencia de construir una nueva solución que no fuera afectada por los hundimientos diferenciales del subsuelo y que trabajara por la acción de la gravedad, esto significó la realización de interceptores como lo son el Poniente, Central, del Oriente y el Emisor.

Para evitar que el hundimiento general afectara el funcionamiento de los interceptores Central y Oriente, se analizó alojarlos a una gran profundidad, lo cual a su vez garantizaba y facilitaba la descarga de cualquiera de los colectores en uso y los que posteriormente se requirieran.

Los interceptores Central y del Oriente tendrían un diámetro interior de 5 m, con longitudes de 7.8 y 10.2 Km. respectivamente (Tablas 1.1 y 1.2), que unirían su descarga al inicio del Emisor Central de 6.5 m de diámetro interior, 50 Km. de longitud y 200 m³/s de capacidad (Tabla 1.3), este a su vez transferiría su gasto al río el Salto, situado a 50 Km. de la Ciudad de México y 130 m más abajo que ésta (Fig. 1.11).

Así, el interceptor Oriente captaría a los ríos de los Remedios, Tlalnepantla, y Cuauhtepac; el interceptor Central captaría los colectores 11 y 15 y el río Consulado.

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

Tabla 1.1 Interceptor Central

Interceptor Central	
Longitud	7.8 Km.
Diámetro	5.00 m
Pendiente	0.0005
Gasto máx.	90 m ³ /s
Velocidad máx.	4.6 m/s
Profundidad media de la plantilla	30 m

Tabla 1.2 Interceptor Oriente

Interceptor Oriente	
Longitud	10.2 Km.
Diámetro	5.00 m
Pendiente	0.0007
Gasto máx.	110 m ³ /s
Velocidad máx.	5.6 m/s
Profundidad media de la plantilla	30 m

Tabla 1.3 Emisor Central

Emisor Central	
Longitud	50 Km.
Diámetro	6.50 m
Pendiente	0.00195
Gasto máx.	200 m ³ /s
Velocidad máx.	6.0 m/s
Profundidad media de la plantilla	120 m

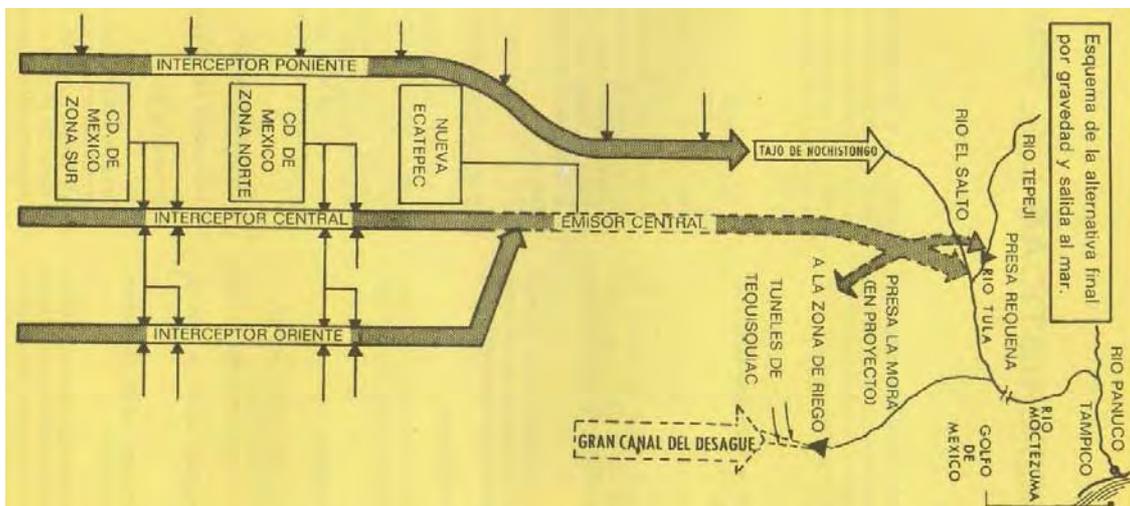


Fig. 1.11 Alternativa final.

1.2 Sistema de Drenaje Profundo

Interceptor Central.

Se inicia en la lumbrera 9, la cual está ubicada en la Avenida Insurgentes Norte esquina Meyerber. El tramo comprendido entre la lumbrera 9 y 10, pasa por debajo de la Avenida Cuitláhuac donde se inicia una curva que termina en la avenida 100 Metros. En este tramo, se localiza la intersección con los túneles profundos de las obras de captación de los colectores río Consulado, Humboldt y 11.

De la lumbrera 10, el trazado del interceptor continúa por la avenida 100 Metros hasta la lumbrera 13, pasando por la lumbrera 11. Entre las lumbreras 10 y 11 se localiza el túnel de acceso a la obra derivadora del colector 15 y, entre el tramo 11-13 se efectúa un cambio en la dirección del interceptor hasta hacerlo entroncar con la lumbrera 0 del Emisor Central. En este tramo, el interceptor capta las aguas que provienen del río Tlalnepantla, antes de llegar a la lumbrera 0.

Interceptor Oriente.

Se inicia en la obra de toma del Gran Canal en el Km. 6+985 del propio canal, de este sitio continúa con un cajón superficial hasta la lumbrera 8C, la cual se encuentra ubicada en el cruce de la avenida oriente 157 con calle 72A de la colonia Salvador Díaz Mirón. El tramo de interceptor comprendido entre la lumbrera 8C y la lumbrera 8A tiene una longitud de 468.647 m y pendiente de 0.0005; la lumbrera 8A se localiza entre la calle General M. Carrera y avenida Ferrocarril Hidalgo.

De la lumbrera 8A continúa el interceptor hacia la lumbrera 8B ubicada en el cruce de la calle Chalchihuitl y la calle Tlacopan; de la lumbrera 8B se dirige hacia la lumbrera 12

localizada en San Juan Ixhuatepec, después se dirige hacia la lumbrera 13 ubicada en Cuauhtec donde por último se une a la lumbrera 0 del Emisor Central.

Emisor Central

Se inicia en la lumbrera 0 la cual se encuentra ubicada en Cuauhtec, Villa Gustavo A. Madero D.F, pasa hacia la lumbrera 1 por debajo del cerro Tenayo y continua con la misma dirección hasta llegar a la lumbrera 2, la cual está ubicada en Barrientos, Tlalnepantla, Estado de México. La lumbrera 3 se localiza cerca del castillo de Barrientos a un lado del camino de circunvalación y el tramo comprendido entre esta lumbrera y la 4, atraviesa la autopista México–Querétaro, así como el parte aguas de la Sierra de Guadalupe que separa la subcuenca de la Ciudad de México de la del río Cuautitlán.

La lumbrera 5, se encuentra en la orilla de la carretera al lago de Guadalupe, y desde esta lumbrera hasta la 13. A continuación se enlista las lumbreras que comprenden este tramo:

Lumbrera N°	Localización
6	Fraccionamiento Cuautitlán Izcalli
7	Carretera la Aurora
8	Hacienda San Miguel, Municipio de Tepetzotlán
9	Barrio Capula, Municipio de Tepoyzotlán
10	Antigua Hacienda la Teja
11y 12	Municipio de Coyotepec
13	Municipio de Huehuetoca

La lumbrera 14A, está ubicada a las orillas de la presa Cuevecillas y al poniente de la autopista México–Querétaro. El tramo comprendido entre la lumbrera 14A y la lumbrera 14, atraviesa la autopista a la altura del puente de Jorobas.

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

De la lumbrera 14, se sigue el Emisor Central hasta cruzar la lumbrera 15, la cual se localiza a un lado del cerro del Sincoque. Entre las lumbreras 15 y 16 se cruza la línea del parte aguas que divide la cuenca del Valle de México de la cuenca del río Panuco.

Debido a que los frentes de excavación 15-16 y 17-16 avanzaron más rápido de lo programado, no fue necesario terminar la excavación de la lumbrera 16, la cual se suspendió faltando 25 m para llegar al Túnel. Posteriormente, por motivos de construcción, se conectaron lumbrera y túnel mediante un tubo de 0.90 m. de diámetro.

De la lumbrera 16, el Emisor Central se sigue hasta la lumbrera 17 en un trazo recto, y de esta lumbrera hasta la lumbrera 21 y hasta el portal de salida el trazado sufre una pequeña deflexión hacia el poniente hasta desembocar en el cauce del río el Salto, que se localiza en la cuenca del río Tepeji.

En la tabla 1.4 se en listan los interceptores con los que cuenta el drenaje profundo.

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

Tabla 1.4 Interceptores del Drenaje profundo

Túnel	Longitud (Km.)	Diámetro (m)	Capacidad (m ³ /s)
Interceptor Iztapalapa	5.5	3.1	20
Interceptor Obrero Mundial	0.8	3.2	20
Interceptor Canal Nacional-Canal de Chalco	11.64	3.1 y 3.2	20
Interceptor Centro Poniente	16	4	40
Interceptor Oriente-Sur	13.8	5	80
Interceptor Centro-Centro	3.7	5	90
Interceptor Poniente	16.2	4	25
Interceptor Oriente-Oriente	3.4	5	90
Interceptor Gran Canal	1	3.1	90
Interceptor río de los Remedios	10.7	5	80

En la figura 1.12 se puede observar la red del drenaje del Valle de México

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México



Fig. 1.12 Sistema de Drenaje del Valle de México

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

Tabla. 1.5 Nomenclatura (Fig1.12 Sistema de Drenaje del Valle de México)

1	Interceptor Oriente	A	Interceptor Poniente
2	Río de los Remedios	B	P.B Río Hondo
3	Planta de Bombeo Km. 18+500	C	Vaso del Cristo
4	Planta de Bombeo CONAGUA	D	La Colorada
5	Túnel Dren General del Valle	E	El Colorado
6	Gran Canal Estado de México	F	Las Julianas
7	Laguna Casa Colorada	G	Los Arcos
8	Obra de Toma Gran Canal	H	Totolica
9	Planta de Bombeo Texcoco	I	Los cuartos
10	Planta de Tratamiento Texcoco Norte	J	Periodista
11	Laguna de Regulación Horaria	K	El Sordo
12	Brazo Izquierdo	L	San Joaquín
13	Río de la compañía	Ll	El Capulín
14	Lago Churubusco	M	Hondo
15	Brazo Derecho	N	Dolores
16	Planta de Bombeo Lago	Ñ	Chapultepec
17	Interceptor Oriente-Oriente	O	Ruiz Cortinez
18	Interceptor Central	P	Tacubaya
19	Interceptor Centro Poniente	Q	Becerra A
20	Gran Canal Distrito Federal	R	Becerra B
21	Interceptor Centro-Centro	S	Becerra C
22	Interceptor Obrero Mundial	T	Mixcoac
23	Río de la Piedad	U	La Mina
24	Colector Apatlaco	V	Tarango
25	P.B Zaragoza	W	Las Flores
26	Colector Churubusco	X	Tequilasco
27	Interceptor Iztapalapa	Y	Texcalatlaco

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Aspectos Generales del Sistema de Drenaje del Valle de México

28	P.B Central de Abastos	Z	Anzaldo
29	Laguna Iztapalapa		
30	Interceptor Oriente Sur		
31	P.B Miramontes		
32	Río Churubusco		
33	Colector Miramontes		
34	Laguna Cienega Grande		
35	Laguna Cienega Chica		
36	Interceptor Canal Nacional-Canal de Chalco		
37	Laguna San Lorenzo Tezonco		

2. Túnel Emisor Central

2.1 Obra derivadora de la Descarga del Túnel Emisor Central

La obra derivadora del Túnel Emisor Central (Fig. 2.1), se inicia en el Km. 49+742.348 del Emisor central y está ubicada aproximadamente 6 Km. a la derecha de la autopista México-Querétaro a la altura de Tepeji del Río, cerca de la margen derecha de la presa Requena.



Fig. 2.1 Obra derivadora del Túnel Emisor Central

La derivación está compuesta por las siguientes obras:

- a) Portal de salida (Fig. 2.2)
- b) Canal principal (Fig. 2.3)
- c) Desarenador (Fig. 2.4)
- d) Vertedor de excedencias (Fig. 2.5)
- e) Canal de toma en curva (Fig. 2.6)
- f) Estructura de control (Fig. 2.7)
- g) Túnel alcantarilla bajo el río el Salto (Fig. 2.8)
- h) Rectificación del río el Salto (Fig.2.9)



Fig. 2.2 Portal de Salida



Fig. 2.3 Canal Principal



Fig. 2.4 Desarenador



Fig. 2.5 Vertedor de Excedencias



Fig. 2.6 Canal de Toma en Curva



Fig. 2.7 Estructura de Control



Fig. 2.8 Túnel alcantarilla bajo el río el Salto



Fig. 2.9 Rectificación del Río el Salto

Se denomina Portal de salida a la transición de túnel a canal rectangular y tiene una longitud de 13.8 m. A partir de esta zona se inicia el canal principal, el cual es de sección rectangular con 11.5 m. de ancho, altura libre variable de 8.24 a 8.88m. y pendiente de 0.008.

Inmediatamente después del canal principal se inicia el vertedor de excedencias, el cual se localiza en la margen izquierda y tiene perfil Creager. En el extremo aguas abajo del vertedor, se localiza un muro de concreto con dos aberturas, en las cuales se instalaron dos compuertas deslizantes de fierro fundido de 1.53 m. de ancho y 1.83 m. de altura, las cuales permiten hacer la limpieza del canal principal.

El vertedor de excedencias divide la estructura en dos canales, uno llamado de descarga de 242 m. de longitud, sección trapezoidal de 6.53 m. de plantilla, taludes 0.8:1 y a nivel, y el otro canal de toma, que tiene un ancho variable de 11.5 a 10 m., altura libre de 7.5 m., longitud en tangente de 55 m. y también a nivel. Entre el canal principal y el de toma, existe un desnivel de 1.7 m.

El canal de toma cruza por debajo del río el Salto, mediante un túnel alcantarilla de 10 m. de ancho dividido en tres cajones por medio de muros de concreto. Antes de cada cajón se instaló una compuerta radial de 3 x 6 x 6 m. (tipo CM-C-70), operada eléctricamente desde el puente de maniobras, para manejar gastos requeridos en el distrito de riego 03. Al final de este túnel alcantarilla, existe una zona de transición de 30 m. de longitud con objeto de pasar de sección rectangular a canal trapezoidal; este canal tiene 3 m. de ancho de plantilla, taludes 1.5:1 y pendiente de 0.002.

Aguas arriba del túnel alcantarilla, el río el Salto se ha rectificado por medio de un canal de concreto de sección trapezoidal de 20 m de ancho, taludes 1.5:1 y pendiente de 0.0083. Después del túnel alcantarilla se ha construido un cimacio, al pie del cual se localiza un tanque amortiguador (Fig. 2.10). Desde este punto hasta la zona de confluencia continúa este canal con la geometría antes descrita, modificando su pendiente a 0.0033.

La zona de confluencia del río el Salto y el canal de descarga, se ha protegido por medio de un revestimiento de concreto, formando una transición gradual hasta su unión con la sección rectificadora del río Tula (Fig. 2.11).



Fig. 2.10 Tanque amortiguador del Río el Salto



Fig. 2.11 Zona de Confluencia

3. Túnel Emisor Oriente

3.1 Descripción General del Túnel Emisor Oriente

En el año de 1975, cuando la población era de 10 millones de habitantes, el Emisor del Poniente que desaloja por el Río Cuautitlán y el Tajo de Nochistongo y el Emisor Central como columna vertebral del Sistema de Drenaje Profundo, podían desalojar hasta 280 m³/s.

En la actualidad, cuando la población prácticamente se ha duplicado, dicha capacidad se ha reducido y solamente se pueden drenar fuera del Valle 165 m³/s. Esto representa un déficit de drenaje respecto de las necesidades actuales, por lo que es necesario realizar obras nuevas, rehabilitar y mantener las existentes.

Por este motivo se plantea una solución mediante un túnel, el cual permitirá contar con una salida complementaria y alterna al Túnel Emisor Central y así reducir el riesgo de inundaciones en la ciudad de México y a su zona conurbada, dando seguridad a 20 millones de habitantes. En temporada de lluvias funcionará de manera simultánea con el actual drenaje profundo y, en épocas de secas, lo hará alternamente para facilitar su mantenimiento.

Esta obra de ingeniería tiene por nombre Túnel Emisor Oriente (TEO), iniciará en la lumbrera 2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios, en los límites del Distrito Federal y el Estado de México, hasta su salida en el río el Salto, estado de Hidalgo, teniendo así una longitud aproximada de 62 Km.

El Túnel Emisor Oriente estará compuesto por 24 lumbreras con profundidades que van desde los 150 m. hasta los 200 m., este túnel permitirá conducir $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (El gasto utilizado dentro del Instituto de Ingeniería UNAM y en esta tesis, es de $170 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para realizar este túnel se utilizarán seis escudos excavadores con las siguientes características por escudo: longitud de 95 m., diámetro del disco cortador de 8.7 m. y un peso de 108 ton., que acoplado al equipo motriz tiene un peso de 600 ton. Estos escudos conforme avanzan, van colocando dovelas al interior del túnel formando los anillos, los cuales son parte importante para esta obra. Estas dovelas están diseñadas para resistir las distintas cargas del suelo, el equipo excavador tiene la capacidad de colocar en promedio 13 anillos por día.

Cada anillo consta de siete dovelas que en total pesan 35 toneladas, al día se fabrican 26 anillos completos en cada una de las plantas, las cuales fueron montadas exclusivamente para fabricar las estructuras de concreto para el túnel. Tres plantas productoras de dovelas se encargan de fabricar los 42,000 anillos de concreto que revestirán el Túnel Emisor Oriente.

Para comprobar que el concreto utilizado en las dovelas cumpla con los requerimientos necesarios para esta obra, se realizan una serie de pruebas, la primera prueba se le aplica cuando sale del curado de vapor, la siguiente es a los tres días, otra a los siete y la última a los 28 días de que se terminó de fabricar. Por lo regular, a los tres días la dovela ya alcanzó la resistencia máxima que es de 350 kilogramos por centímetro cuadrado.

Cuando ya cubrió todo el protocolo de pruebas, la dovela ya está lista para ser transportada a alguna de las lumbreras del Túnel Emisor Oriente.

3.2 Obra de Derivación del Túnel Emisor Oriente

La derivación está compuesta por las siguientes obras (Fig. 3.1):

- a) Portal de salida
- b) Canal principal
- c) Desarenador
- d) Vertedor de excedencias
- e) Túnel alcantarilla bajo el río el Salto (se utilizará el mismo del TEC)
- f) Encauzamiento río el Salto
- g) Mejoramiento de zonas adyacentes a canales y estructuras para vigilancia.

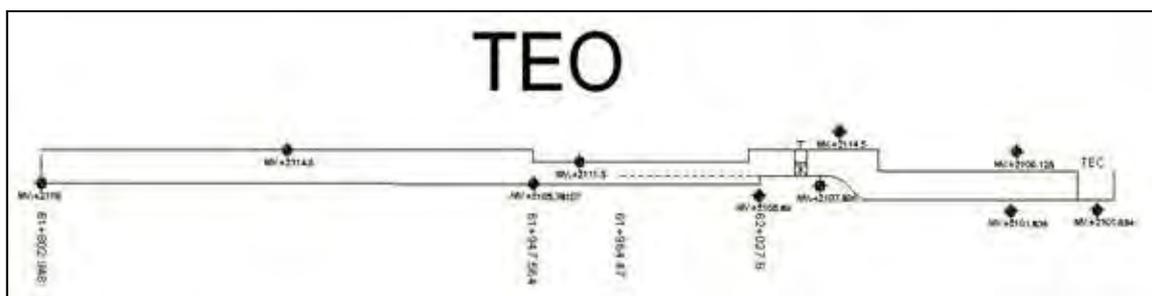


Fig. 3.1 Obra de derivación del Túnel Emisor Oriente

Se denomina Portal de salida a la transición de túnel a canal rectangular y tiene una longitud de 15 m (Apéndice A). A partir de esta zona se inicia el canal principal, el cual es de sección rectangular con 12 m. de ancho y pendiente de 0.0015139.

Inmediatamente después del canal principal se inicia el vertedor de excedencias que se localiza en la margen derecha del canal y tiene perfil Creager (Apéndice B), este vertedor se unirá al Río El Salto (Fig. 3.2).

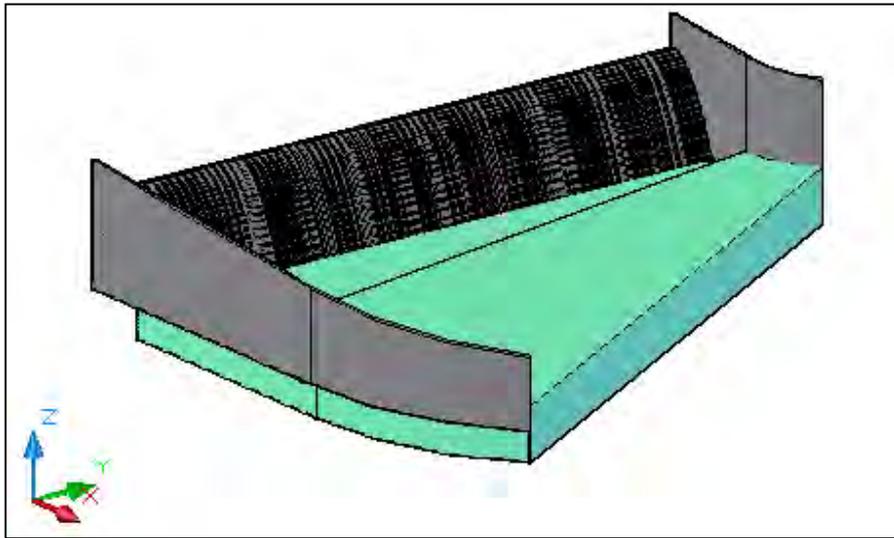


Fig. 3.2 Isométrico del vertedor de excedencias del TEO

En el extremo aguas abajo donde el canal rectangular entra en curva se localiza un muro de concreto con dos aberturas, en el cual se podrán colocar dos compuertas deslizantes de fierro fundido que permitirá hacer la limpieza del canal principal.

El canal principal del Túnel Emisor Oriente se une a la obra derivadora del Túnel Emisor Central, esta unión esta regulada por un conjunto de compuertas radiales de 3 x 6 x 6 m. (tipo CM-C-70), operada eléctricamente desde el puente de maniobras, para manejar gastos requeridos en el distrito de riego 03. Entre el canal principal del TEO y el canal que se unirá al TEC, existe un desnivel de 2 m. este desnivel permitirá desarenar el canal principal del TEO.

El río El Salto se ha rectificificado hasta el vertedor del TEO por medio de un canal de concreto de sección trapecial de 20 m. de ancho, taludes 1.5:1 y pendiente de 0.0083. (Fig. 3.3)

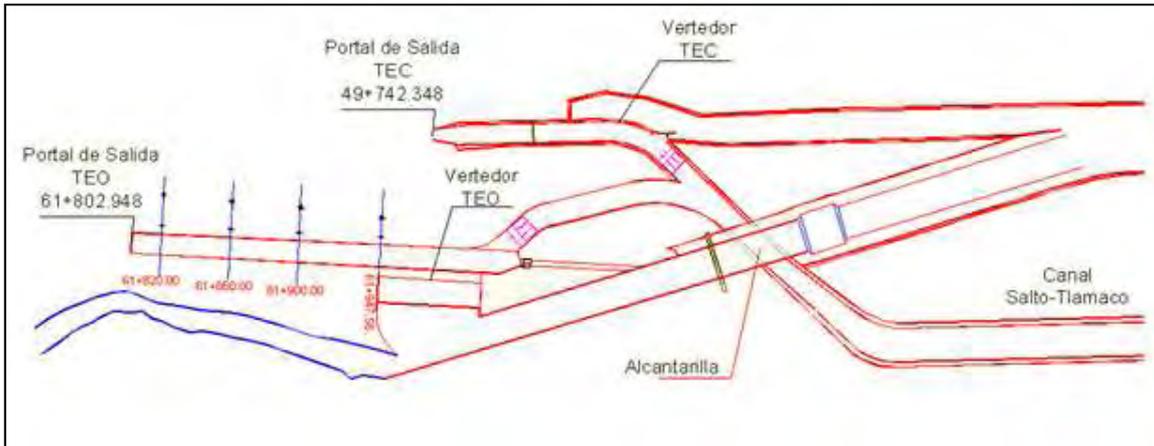


Fig. 3.3 Obra de derivación del Túnel Emisor Central y Túnel Emisor Oriente

3.3 Descripción General de Cada uno de los Elementos que Componen la Obra de Derivación

Portal de salida

- El portal de salida está sobre el cad. 61+802.948 (El cual corresponde al trazo del TEO desde la lumbrera 0 fig. 3.4).
- El Túnel Emisor Oriente tiene un diámetro interior de 7 m.
- La plantilla del portal de salida del TEO se encuentra en la cota 2106 m.s.n.m
- El túnel pasa a un canal de sección rectangular con ancho de plantilla de 12 m., esta transición tiene una longitud de 15 m.



Figura 3.4 Trazo del TEO

Vertedor

- Perfil Creager
- El vertedor inicia en el cad. 61+947.56
- Nivel de plantilla 2105.781 m.s.n.m
- Nivel de cresta 2111.5 m.s.n.m
- Longitud de cresta 60 m
- Cuenta con un tanque amortiguador de 15 m.

Desarenador

- Cad. 62+027.6
- Nivel de plantilla 2105.66 m.s.n.m
- Dos aberturas en las que se podrá instalar dos compuertas deslizantes de fierro fundido de 1.53 m. de ancho y 1.83 m. de altura, las que permiten hacer la limpieza del canal principal.

Canal de unión del TEO y el TEC

- Su inicio se encuentra en la cota 2107.66 m.s.n.m
- Cuenta con una rápida inmediatamente después de las compuertas radiales para llegar a la misma cota 2101.634 m.s.n.m que tiene la obra de toma del TEC (Apéndice C).
- Después de la rápida el canal se mantiene horizontal hasta unirse con la obra de toma del TEC.

4. Ecuaciones Fundamentales para el Cálculo de Perfiles Hidráulicos

4.1 Cálculo del Flujo Uniforme.

Se considera que el flujo uniforme tiene las siguientes características principales:

- 1) La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes
- 2) La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos; es decir, sus pendientes son todas iguales, o $S_E = S_w = S_0 = S$ (Fig. 4.1)

S_E es la pendiente de la línea de energía

S_w es la pendiente de la superficie libre

S_0 es la pendiente del fondo

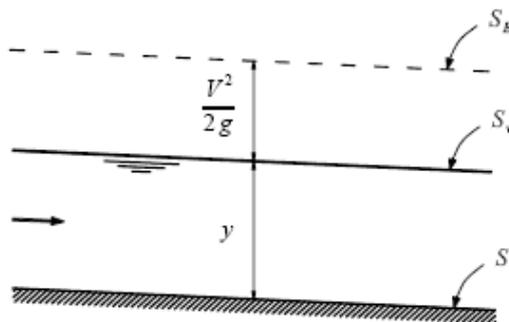


Fig. 4.1 Movimiento uniforme en un canal

En la práctica es muy difícil encontrar un movimiento que sea estrictamente uniforme. En muchos casos el flujo en canales y ríos se considera, desde el punto de vista del ingeniero, uniforme.

En el cálculo del flujo uniforme intervienen seis variables:

- a) Gasto
- b) Velocidad
- c) Tirante
- d) Coeficiente de Manning
- e) Pendiente
- f) Dimensión de la sección

Son dos ecuaciones con las que se puede realizar el cálculo:

- 1) Ecuación de continuidad

$$Q = AV$$

- 2) Ecuación de Manning para la fricción

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Sustituyendo la ecuación de Manning para la fricción en la de continuidad se puede expresar al gasto como:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

o de la siguiente manera

$$AR_h^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S}}$$

Así el término de la derecha de la ecuación anterior depende de n , Q y S , pero el de la izquierda únicamente de la geometría de la sección, con esto se puede hacer notar que para una condición de n , Q y S hay un tirante único “ y ”, llamado “tirante normal” que se establece en flujo uniforme siempre que el módulo de sección sea continua y creciente del tirante.

4.2 Cálculo de las condiciones críticas

El estado crítico del flujo a través de una sección de canal se caracteriza por varias condiciones entre las más importantes se encuentran:

- a) La energía específica es mínima para un caudal determinado
- b) El caudal es máximo para una determinada energía específica
- c) La fuerza específica es mínima para un caudal determinado
- d) La altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica en un canal de baja pendiente
- e) El número de Froude es igual a la unidad
- f) La velocidad es igual a la celeridad de pequeñas ondas gravitacionales en aguas poco profundas causadas por perturbaciones locales.

El problema más común consiste en determinar el tirante crítico y la energía específica mínima cuando se conoce las dimensiones de la sección y el gasto. Las condiciones en que se desarrolla el régimen crítico en un canal deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q^2}{g \cos \theta / \alpha} = \frac{A_c^3}{T_c}$$

$$E_c = \left(y_c + \frac{1}{2} \frac{A_c}{T_c} \right) \cos \theta$$

donde

T_c es el ancho de superficie libre de la sección.

Para las secciones más comunes en canales artificiales se han desarrollado ecuaciones más sencillas, o bien diagramas que permiten la solución directa. A continuación solo se hará mención de las ecuaciones para secciones rectangulares y trapeciales.

a) Sección rectangular

$$\frac{Q}{\sqrt{g'}} = \frac{b^{2/3} y_c^{3/2}}{b^{1/2}}$$

donde

$$g' = g \cos \theta / \alpha$$

haciendo $q = Q/b$ (gasto unitario), el tirante crítico es

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g'} \right)$$

Permitiendo su cálculo directo.

b) Sección trapecial

Para tener un procedimiento de cálculo, se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$\frac{Q^2}{g' b^2} = \frac{(b + ky_c)^3 y_c^3}{b^2 (b + 2ky_c)} = \frac{[1 + (ky_c/b)]^3 y_c^3}{1 + 2(ky_c/b)}$$

o bien

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{g' b^2} \right)^{1/3} \left[\frac{[1 + 2(ky_c/b)]^{1/3}}{1 + (ky_c/b)} \right]$$

4.3 Cálculo del perfil del flujo en canales

El cálculo del flujo gradualmente variado involucra en esencia la solución de la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, para conocer la variación del tirante a lo largo de un canal, donde se conoce la pendiente, el coeficiente de Manning y el caudal que conduce. En el caso general, el canal puede o no ser prismático y tener o no una rugosidad uniforme en toda su longitud.

Para calcular el perfil del flujo en un canal, existe una variedad de técnicas, cada una adecuada al caso particular que se trate:

- Método de integración grafica
- Método de integración directa
- Método por pasos

En esta tesis sólo se manejara el método directo por pasos.

4.4 Método Directo por Pasos

En general, un método de paso se caracteriza por dividir el canal en tramos cortos y llevar a cabo los cálculos paso a paso desde un extremo del tramo hasta el otro (el inicio del cálculo dependerá del régimen), procurando que la distancia entre cada tramo sea pequeña³.

En la figura 4.2 se muestra el tramo de un canal prismático con rugosidad uniforme, limitado por las secciones 1 y 2 separadas por una distancia Δx .

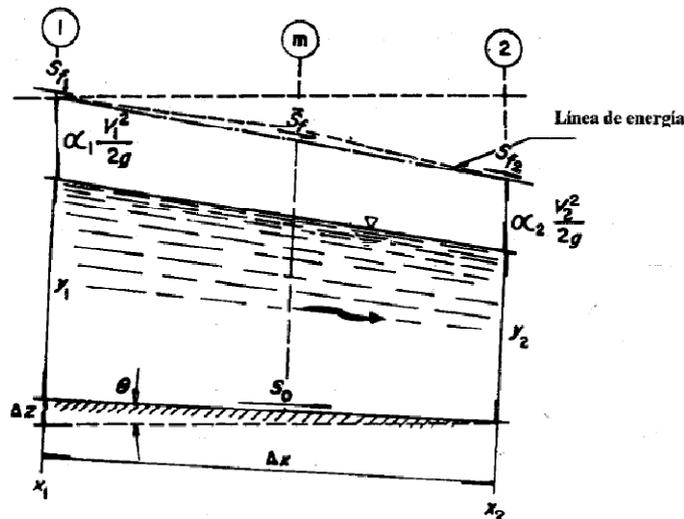


Fig. 4.2 Tramo de un canal prismático

Aplicando la ecuación dinámica entre ambas secciones en términos de incrementos finitos, resulta:

$$\Delta x = \frac{(1 - \bar{F}^2) \cos \theta \Delta y}{S_0 - \bar{S}_f}$$

³ Un criterio es considerar que la velocidad entre las dos secciones no difiera en más de 20%

donde

\bar{F} es el valor medio del número de Froude en las secciones

\bar{S}_f la pendiente media de fricción del tramo.

si se sustituye

$$E_2 - E_1 = \Delta E = (1 - \bar{F}^2) \cos \theta \Delta y$$

entonces

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - \bar{S}_f} \tag{4.1}$$

La pendiente de fricción en cada sección se calcula mediante la ecuación de Manning:

$$S_{f1} = \left[\frac{V_1 n}{R_{h1}^{2/3}} \right]^2$$

$$S_{f2} = \left[\frac{V_2 n}{R_{h2}^{2/3}} \right]^2$$

Conocido el tipo de perfil y la dirección en que se efectúa el cálculo, se conocen las características hidráulicas en alguna de las dos secciones (en la sección 1 si es en la dirección del flujo, o en la 2 si es en la dirección opuesta). A partir de una sección de control de tirante conocido, se calcula un tirante en la sección próxima, y con la ecuación 4.1 se calcula la distancia que los separa, con esto se conoce la localización del tirante que se estimó, el cual ahora pasa a ser el tirante conocido.

5. Revisión Hidráulica de la Obra Derivadora del Túnel Emisor Oriente

El análisis hidráulico de la obra derivadora del Túnel Emisor Oriente, se realiza estudiando el comportamiento que tendrá el vertedor propuesto, ya que este puede ser el punto crítico para el funcionamiento de toda la obra derivadora. Cabe mencionar, que no se podrá hacer el análisis hidráulico de la obra de toma que se dirige hacia la zona de riego 03, debido al difícil acceso a las políticas de operación de compuertas de dicha obra.

A continuación, se analizará el funcionamiento del vertedor, ya que se considera que esta es la obra que puede comprometer tanto el funcionamiento del portal del TEO, como a la descarga hacia el río, pues en el primer caso, podría ser que el tirante sobrepase la clave del túnel y con ello hacer que este trabaje a presión, mientras que para el segundo caso, el tirante en el río podría alcanzar un nivel mayor al de la cresta del vertedor y con esto ahogar la descarga.

a) Revisión desde el portal de salida hasta el vertedor

Datos (fig. 5.1)

Nivel de plantilla del Portal de salida: 2106 m.s.n.m

Nivel de plantilla sobre el TEO donde inicia el vertedor: 2105.781 m.s.n.m

Nivel de cresta: 2111.5 m.s.n.m

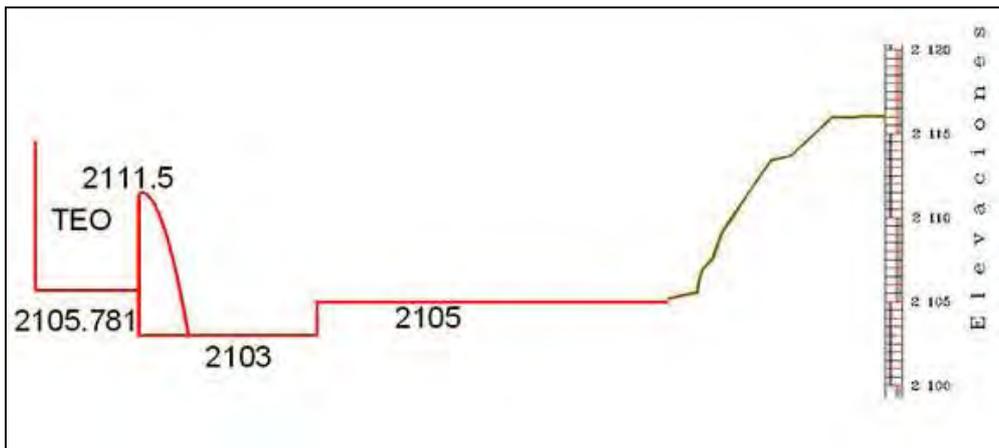


Figura 5.1 Perfil del vertedor

Para realizar este análisis se considera que el nivel del agua sobre el vertedor es constante (Apéndice D). Para obtener la carga sobre la cresta, se utiliza la fórmula general de vertedores:

$$Q = CL_e H^{3/2}$$

donde

C = Coeficiente de descarga, en $m^{1/2}/s$.

H = Carga total sobre la cresta, en m.

L_e = Longitud efectiva de cresta, en m.

Q = Descarga, en m^3/s

$Q=CL_e H^{3/2}$	
C	1.7
L_e	60
Q	170
H	1.4057

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Revisión Hidráulica de la Obra Derivadora del Túnel Emisor Oriente

Por lo tanto, el tirante será la suma de la carga del vertedor más la diferencia entre la cresta y la plantilla del canal donde inicia el vertedor.

Tirante = 7.05 m.

datos

Q_{TEO}	170	m^3/s
b	12	m
n	0.017	$s/m^{1/3}$
S_0	0.0015139	

Ahora con este tirante, se realiza el cálculo del perfil hacia aguas arriba con el método directo por pasos, hasta llegar al portal de salida que se encuentra a una distancia de 144.612 m (cabe recordar, que el criterio de incrementos de tirantes es considerar que la velocidad no varíe más de 20% entre cada sección) Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Cálculo del perfil por el método directo por pasos

Y	A	P	R_h	V	Fr	Sf	ΔY	F_r promedio	S_f promedio	Δx	$\Sigma \Delta x$
7.05	84.6	26.1	3.241	2.009	0.242	0.00024	-	-	-	-	-
7	84	26	3.231	2.024	0.244	0.00025	-0.05	0.2429	0.00025	-37.095	-37.095
6.9	82.8	25.8	3.209	2.053	0.250	0.00026	-0.1	0.2469	0.00025	-74.450	-111.545
6.856	82.272	25.712	3.200	2.066	0.252	0.00026	-0.044	0.2508	0.00026	-32.872	-144.417

Como se puede observar, el tirante en el portal es de 6.85 que corresponde a la cota 2112.85 m.s.n.m, debido a que la clave del túnel está en la 2113 m.s.n.m se puede concluir que el túnel no se ahoga, por tanto, el vertedor pasa la primera revisión (fig. 5.2).

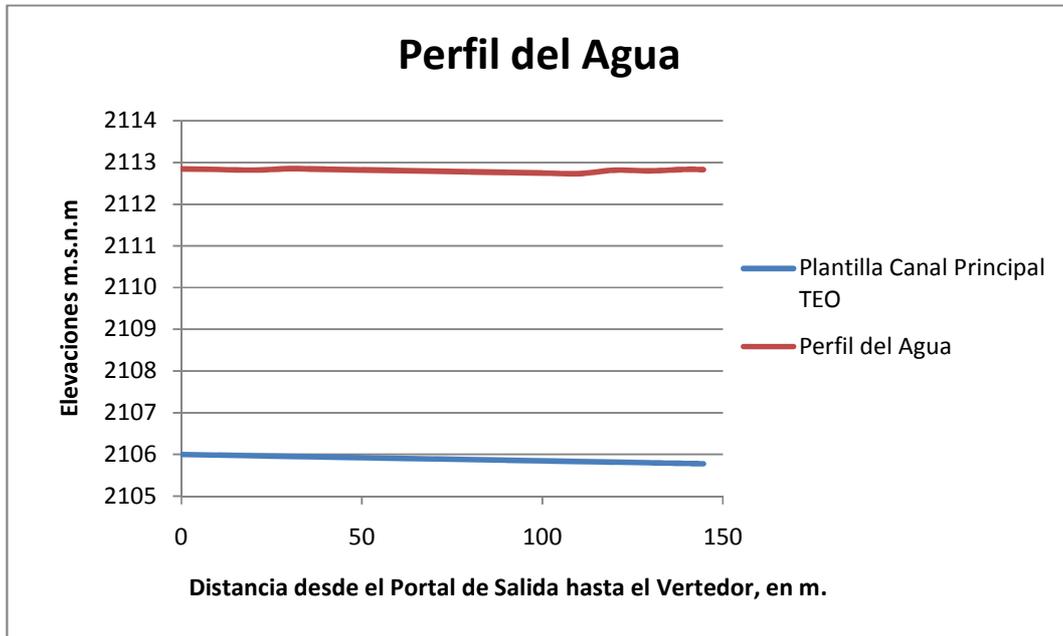


Fig. 5.2 Perfil del Agua en el Canal Principal TEO

A continuación se calcula el perfil del río para verificar que el nivel del agua se encuentre por debajo del nivel de cresta y con ello permita que el vertedor descargue eficientemente.

- b) Revisión del perfil sobre el río (desde la rápida que se encuentra sobre el río, hasta la descarga del vertedor del TEO)

Para realizar el perfil en el río El Salto, se considera que aguas abajo donde existe su tanque amortiguador se presenta el tirante crítico al inicio de la rápida, donde la suma de gastos (TEO y Río el Salto) es de 250 m³/s.

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente
Revisión Hidráulica de la Obra Derivadora del Túnel Emisor Oriente

Q_{TEO} y El Salto	250	m^3/s
b	20	m
k	1.5	
g	9.81	m/s^2
y_c	2.36	m

Ahora con ayuda del método directo por pasos se analizará el perfil del agua en el río, este proceso iterativo terminará hasta obtener la distancia que existe desde el inicio de la rápida, hasta la ubicación del vertedor, cuya longitud es de 230 m (Tabla 5.2).

Datos del Canal		
b	20	m
Q	250	m^3/s
k	1.5	
n	0.017	$s/m^{1/3}$
S_0	0.0083	

Tabla 5.2 Cálculo del perfil en el Río el Salto con el método directo por pasos

Y	A	P	R_h	V	F_r	S_f	ΔY	F_r promedio	S_f promedio	Δx	$\Sigma \Delta x$
2.36	55.554	28.509	1.949	4.500	1.003	0.0024	-	-	-	-	-
2.5	59.375	29.014	2.046	4.211	0.908	0.0020	-0.14	0.955	0.0022	-1.994	-1.994
3	73.500	30.817	2.385	3.401	0.659	0.0010	-0.5	0.784	0.0015	-28.434	-30.427
3.5	88.375	32.619	2.709	2.829	0.500	0.0006	-0.5	0.580	0.0008	-44.456	-74.883
4	104.000	34.422	3.021	2.404	0.392	0.0004	-0.5	0.446	0.0005	-51.346	-126.229
4.5	120.375	36.225	3.323	2.077	0.315	0.0003	-0.5	0.353	0.0003	-54.824	-181.053
4.8	130.560	37.307	3.500	1.915	0.278	0.0002	-0.3	0.296	0.0002	-33.888	-214.941
4.9	134.015	37.667	3.558	1.865	0.268	0.0002	-0.1	0.273	0.0002	-11.414	-226.355
4.932	135.127	37.783	3.576	1.850	0.264	0.0002	-0.032	0.266	0.0002	-3.663	-230.019

Se puede observar que el tirante de agua que se presentaría en el río es de 4.93 m, lo que equivale a la cota 2109.93 m.s.n.m, debido a que la cresta del vertedor es la 2111.5 m.s.n.m existe una diferencia de 1.57 m. y por tanto, el vertedor puede descargar sin problema (fig. 5.3).

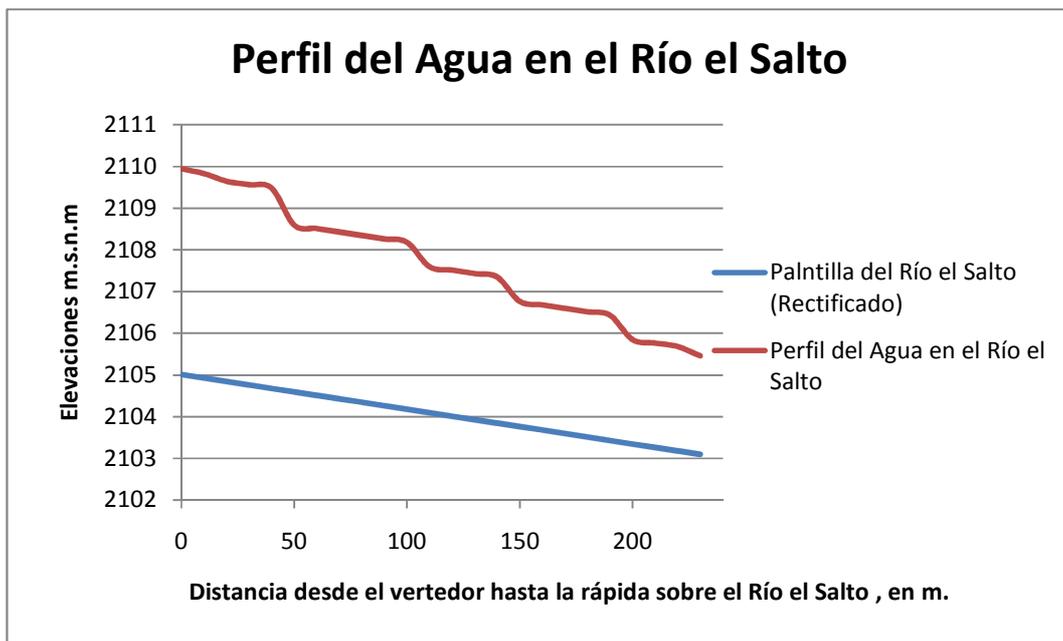


Fig. 5.3 Perfil del Agua sobre el Río el Salto (el vertedor corresponde a 0 m. y la rápida a 230 m.)

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta un diseño de la obra derivadora del Túnel Emisor Oriente, el cual sirvió como base para la construcción del modelo físico realizado en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Se puede concluir, que el diseño presentado en este trabajo para la obra derivadora del TEO es funcional, aunque no es necesariamente la óptima debido a que sería necesario realizar otro tipo de análisis en conjunto, por ejemplo:

- Un análisis de suelos
- Seguridad
- Costos y beneficios

Una vez aprobada la posible solución, es necesario esperar los resultados de las pruebas del modelo físico para corregir y mejorar el diseño, obteniendo así el mejor funcionamiento, ya que una obra de tal magnitud e importancia para la seguridad de más de 20 millones de habitantes, no puede tomarse a la ligera.

Por último, es necesario recordar que los problemas de inundaciones siempre han existido y con éstos, siempre han surgido soluciones aunque ellas nunca han sido preventivas, sino que se realizan después de presentarse una inundación. Tal vez la solución no sólo sea la construcción de nuevas obras para prevenir dichas inundaciones, sino frenar el crecimiento desorganizado de la Ciudad de México.

Bibliografía

Arreguín Cortés Felipe I., et al., *“El agua en las grandes ciudades”* Revista Ingeniería Civil, CICM, N° 447 México 2006, p 20-29.

Barrios Sandoval Roberto Carlos, *“El drenaje profundo de la ciudad de México: problemática y alternativas de solución”*, Tesis de Licenciatura, Facultad de estudios superiores Aragón UNAM, México 2008.

Domínguez Mora Ramón, *“Sistema para el control y drenaje de las avenidas en el área metropolitana del valle de México”*, Instituto de Ingeniería, serie N° 593, México 1997.

Domínguez Mora Ramón, *“El sistema principal de drenaje del área metropolitana del valle de México”*, Instituto de Ingeniería, serie CI-22, México 2001

Gardea Villegas Humberto, *“Hidráulica de Canales”*, Facultad de Ingeniería, México 1999.

Gracia Sánchez Jesús, *“Obras de excedencias”*, Sección hidrotecnia, Tema hidráulica, Capitulo 10, Manual de Diseño de Obras Civiles, CFE,II,IIE, México 1995

“La técnica al servicio del desarrollo” Revista Ingeniería Civil, CICM, N°252, México 1988, p 21-26.

Moreno F. Andrés, *“El sistema de drenaje profundo solución integral a un gran problema”* Revista Ingeniería Civil, CICM, N° 252 México 1988, p 8-11.

Sotelo Ávila Gilberto, *“Hidráulica de Canales”*, Facultad de Ingeniería, ICA, México 2002.

“Una tradición centenaria” Revista Ingeniería Civil, CICIM, N° 252 México 1988, p 15-20

“*Urgen obras para el drenaje de la ciudad de México*” Revista Ingeniería Civil, CICM, N°460 México 2007, p 20-25.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/FT-TEO0609.pdf>

http://www.paot.org.mx/paot_docs/pdf/TunelEmisorOriente.pdf

http://www.presidencia.gob.mx/infografias/2009/junio/040609tunel_emisor_orient/index.html

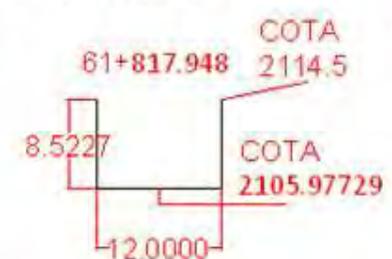
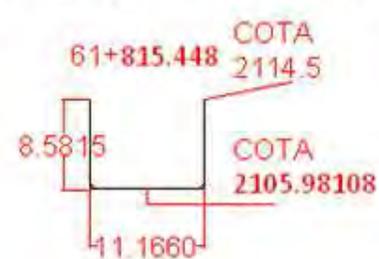
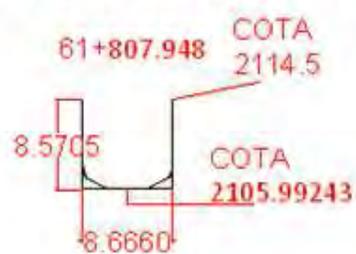
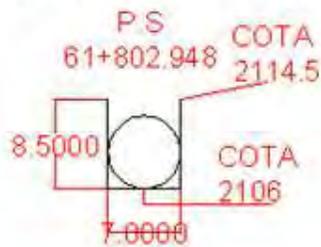
<http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/>

Apéndice A

Transición del portal de salida

TEO

Transición del Portal de salida (la transición tiene una longitud de 15 m)



A continuación, se presentan los pares coordenados para dibujar la transición correspondiente a cada cadenamiento.

CADENAMIENTO 807.948					
X	Y	X	Y	X	Y
-4.333	0	-4.067	-2.257	4.073	-2.245
-4.333	-1.174	-4.06	-2.27	4.08	-2.232
-4.327	-1.35	-4.053	-2.283	4.087	-2.218
-4.32	-1.423	-4.047	-2.295	4.093	-2.205
-4.313	-1.479	-4.04	-2.307	4.1	-2.191
-4.307	-1.526	-4.033	-2.319	4.107	-2.177
-4.3	-1.567	-4.027	-2.331	4.113	-2.163
-4.293	-1.604	-4.02	-2.342	4.12	-2.149
-4.287	-1.639	-4.013	-2.354	4.127	-2.134
-4.28	-1.67	-4.007	-2.365	4.133	-2.119
-4.273	-1.7	-4	-2.376	4.14	-2.104
-4.267	-1.728	-3.993	-2.387	4.147	-2.089
-4.26	-1.755	-3.987	-2.398	4.153	-2.073
-4.253	-1.78	-3.98	-2.409	4.16	-2.057
-4.247	-1.804	-3.973	-2.419	4.167	-2.04
-4.24	-1.828	-3.967	-2.43	4.173	-2.023
-4.233	-1.85	-3.96	-2.44	4.18	-2.006
-4.227	-1.872	-3.953	-2.451	4.187	-1.988
-4.22	-1.893	-3.947	-2.461	4.193	-1.97
-4.213	-1.913	-2	-3.508	4.2	-1.952
-4.207	-1.933	0	-3.508	4.207	-1.933
-4.2	-1.952	2	-3.508	4.213	-1.913
-4.193	-1.97	3.947	-2.461	4.22	-1.893

Estudio del Comportamiento Hidráulico del Vertedor de Salida del Túnel Emisor Oriente**Apéndice A**

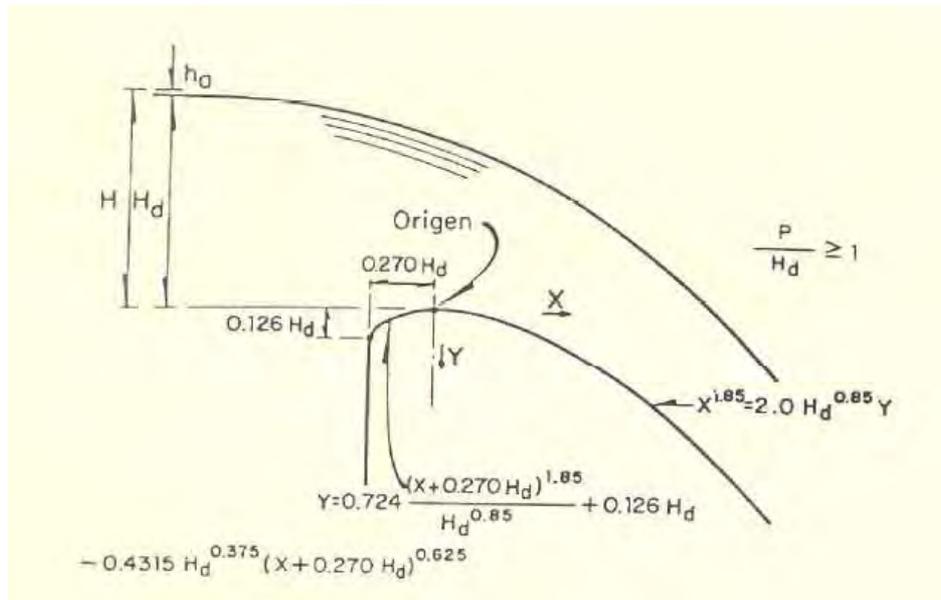
-4.187	-1.988	3.953	-2.451	4.227	-1.872
-4.18	-2.006	3.96	-2.44	4.233	-1.85
-4.173	-2.023	3.967	-2.43	4.24	-1.828
-4.167	-2.04	3.973	-2.419	4.247	-1.804
-4.16	-2.057	3.98	-2.409	4.253	-1.78
-4.153	-2.073	3.987	-2.398	4.26	-1.755
-4.147	-2.089	3.993	-2.387	4.267	-1.728
-4.14	-2.104	4	-2.376	4.273	-1.7
-4.133	-2.119	4.007	-2.365	4.28	-1.67
-4.127	-2.134	4.013	-2.354	4.287	-1.639
-4.12	-2.149	4.02	-2.342	4.293	-1.604
-4.113	-2.163	4.027	-2.331	4.3	-1.567
-4.107	-2.177	4.033	-2.319	4.307	-1.526
-4.1	-2.191	4.04	-2.307	4.313	-1.479
-4.093	-2.205	4.047	-2.295	4.32	-1.423
-4.087	-2.218	4.053	-2.283	4.327	-1.35
-4.08	-2.232	4.06	-2.27	4.333	-1.174
-4.073	-2.245	4.067	-2.257	4.333	0

CADENAMIENTO 815.448	
X	Y
-5.583	0
-5.583	-2.936
-5.582	-2.98
-5.58	-2.998
-5.578	-3.012
-5.577	-3.024
-5	-3.519
0	-3.519
5	-3.519
5.577	-3.024
5.578	-3.012
5.58	-2.998
5.582	-2.98
5.583	-2.936
5.583	0

CADENAMIENTO 817.948	
X	Y
-6	0
-6	-3.522708
0	-3.522708
6	-3.522708
6	0

APÉNDICE B

Diseño del perfil del vertedor



Cálculo del cuadrante aguas arriba para el sistema coordenado mostrado

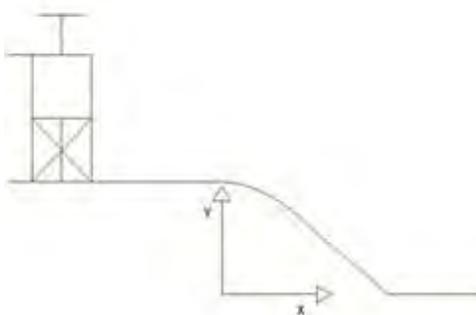
X	Y
0	0.00018243
-0.03795447	-0.00088044
-0.07590894	-0.00411347
-0.11386341	-0.00967109
-0.15181788	-0.01775701
-0.18977235	-0.02865221
-0.22772682	-0.04276855
-0.26568129	-0.06076512
-0.30363576	-0.08385413
-0.34159023	-0.1149389
-0.3795447	-0.17712086

Cálculo del cuadrante aguas abajo para el sistema coordinado mostrado

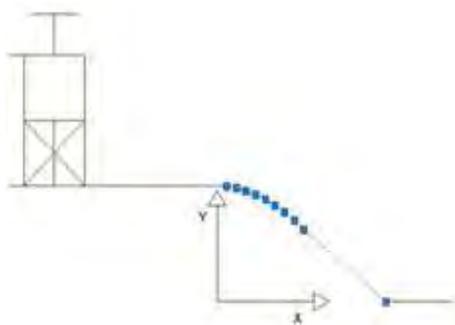
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0.09702253	-0.01	2.11766399	-1.5	3.54949828	-3.9	4.5999018	-6.3
0.14112095	-0.02	2.19284388	-1.6	3.59840814	-4	4.63922618	-6.4
0.20526288	-0.02	2.26589391	-1.7	3.64675935	-4.1	4.67826925	-6.5
0.25556118	-0.03	2.33699469	-1.8	3.69457167	-4.2	4.71703729	-6.6
0.29855843	-0.04	2.40630243	-1.9	3.74186374	-4.3	4.75553638	-6.7
0.33683183	-0.05	2.47395334	-2	3.78865313	-4.4	4.79377234	-6.8
0.37171818	-0.06	2.54006704	-2.1	3.83495642	-4.5	4.83175081	-6.9
0.40401851	-0.07	2.60474929	-2.2	3.8807893	-4.6	4.86947723	-7
0.43425843	-0.08	2.66809413	-2.3	3.92616663	-4.7	4.90695681	-7.1
0.46280524	-0.09	2.73018564	-2.4	3.97110248	-4.8	4.94419463	-7.2
0.48992776	-0.1	2.79109935	-2.5	4.01561021	-4.9	4.98119557	-7.3
0.71260844	-0.2	2.85090342	-2.6	4.05970252	-5	5.01796435	-7.4
0.88722839	-0.3	2.90965964	-2.7	4.10339149	-5.1	5.05450553	-7.5
1.03650137	-0.4	2.96742418	-2.8	4.14668859	-5.2	5.09082353	-7.6
1.16937464	-0.5	3.02424834	-2.9	4.18960479	-5.3	5.12692263	-7.7
1.29048911	-0.6	3.08017909	-3	4.23215053	-5.4	5.16280695	-7.8
1.40262572	-0.7	3.13525958	-3.1	4.27433578	-5.5	5.19848052	-7.9
1.50760926	-0.8	3.18952955	-3.2	4.31617006	-5.6	5.2339472	-8
1.60671485	-0.9	3.24302572	-3.3	4.35766249	-5.7	5.26921077	-8.1
1.70087574	-1	3.29578209	-3.4	4.39882179	-5.8	5.30427487	-8.2
1.7907997	-1.1	3.3478302	-3.5	4.43965631	-5.9	5.33914304	-8.3
1.87703885	-1.2	3.39919941	-3.6	4.48017404	-6	5.37381873	-8.4
1.96003393	-1.3	3.44991706	-3.7	4.52038267	-6.1	5.40830526	-8.5
2.0401435	-1.4	3.50000872	-3.8	4.56028956	-6.2		

Apéndice C

Cálculo del perfil de la rápida ubicada en la unión de la obra de toma del TEC y TEO



Pares coordenados necesarios para dibujar el perfil de la rápida.



Rápida	
X	Y
0.3583	2107.60618
0.4383	2107.52618
0.5783	2107.38618
0.7683	2107.19618
1.0183	2106.94618
1.3283	2106.63618
1.6883	2106.27618
2.1083	2105.85618
2.5783	2105.38618
6.3283	2101.63618

Apéndice D

Justificación sobre la consideración del nivel del agua constante sobre el vertedor

TEO			
Q = 170 m ³ /s			
Distancia sobre la cresta		Tirantes medidos sobre la cresta	
Modelo	Prototipo	Modelo	Prototipo
m	m	m	m
0	0	0.0378	1.134
0.5	15	0.04192	1.2576
1	30	0.04082	1.2246
1.5	45	0.04162	1.2486
2	60	0.0432	1.296

Los datos medidos en el modelo físico comprueban que el considerar el nivel del agua constante sobre la cresta del vertedor es una buena aproximación, debido a que en 60 m de longitud de cresta el perfil del agua solo varía 0.162 m. También se puede observar que la carga sobre la cresta obtenida con la fórmula general de vertedores da como resultado el valor de 1.4 m., siendo esta muy parecida a la medida en el modelo que corresponde a 1.23 m.



Fotos del modelo físico donde se puede observar el funcionamiento del vertedor del TEO