

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“MEJORAMIENTO PARA LA CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL
AGUA EN LA RED MAYOR DEL DISTRITO DE RIEGO 014, RÍO
COLORADO”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
PRESENTA**

Juan Carlos Tapia Olivas

DIRECTOR

Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez

CODIRECTOR

Dr. Jesús Adolfo Román Calleros

Mexicali, B. C.

Junio de 2010

Dedicado a:
A mi Familia por el apoyo incondicional.

Mi reconocimiento a:
Dr. Héctor Campbell Ramírez
Dr. Jesús A. Román Calleros
Dr. Jorge Ramírez Hernández

Contenido

Índice general.

	Pág.
Índice de tablas _____	11
Índice de figuras _____	16
Resumen _____	26
Capítulo 1: Identificación y definición de la problemática.	
Introducción. _____	28
Antecedentes. _____	29
Contexto Nacional. _____	30
Contexto Estatal. _____	31
Contexto Local. _____	35
Situación Actual. _____	38
Planteamiento del Problema. _____	41
Hipótesis. _____	41
Justificación del Proyecto. _____	42
Objetivos. _____	43
Capítulo 2: Marco Teórico y Metodológico.	
Marco Conceptual _____	45
Principios de Hidráulica. _____	45
Propiedades del Agua y de Conductos. _____	73

	Pag.
Concepto de Gasto o Caudal. _____	46
Ecuación de Continuidad. _____	48
Principio de Conservación de la Energía	
Hidráulica. _____	48
Flujo en Canales Abiertos. _____	48
Evaporación. _____	49
Infiltración. _____	50
Relación entre el coeficiente de permeabilidad (k), la pérdida unitaria por infiltración (R) y el espesor del revestimiento (e). _____	51
Eficiencia de Conducción. _____	51
Modelo de simulación hidráulica. _____	52
Descripción general del modelo matemático empleado. _____	53
Validación. _____	62
Materiales. _____	63
Materiales para trabajo de gabinete. _____	63
Materiales para trabajo en campo. _____	63
Métodos	
Trabajo de Gabinete. _____	64
Trabajo de Campo. _____	66

	Pag.
Capítulo 3: Descripción del Área de Estudio.	
Contexto General. _____	71
Entorno Natural.	
Geología. _____	72
Hidrología Superficial. _____	73
Región Hidrológica Baja California Noreste	
(No. 4). _____	73
Región Hidrológica número 7 “Río	
Colorado”. _____	75
Principales Ríos y Arroyos. _____	77
Unidades Geohidrológicas. _____	77
Suelos. _____	80
Clima.	
Características climatológicas de la	
cuenca. _____	82
Precipitación. _____	86
Ubicación del área de estudio. _____	88
Accesos. _____	90
Características hidráulicas del D.R. 014 Río	
Colorado. _____	91
Tipo de Canales. _____	92
Tipo de Drenes. _____	93

	Pag.
Descripción del Canal Independencia.	
Usuarios del Canal Independencia. _____	94
Eficiencia en la conducción del Canal Independencia. _____	95
Estado actual de la evaluación operativa del canal. _____	96
Análisis sobre caudales de conducción. _____	98
Problemática por el Canal Todo Americano. _____	98
Capítulo 4: Resultados del Estudio.	
Introducción. _____	100
Gastos de operación en el Canal Independencia. _____	100
Secciones del Canal Independencia para la simulación. _____	102
Validación del Modelo. _____	107
Superficie de Área Expuesta a Evaporación. _____	110
Evaporación. _____	112
Validación de evaporación. _____	112
Infiltración. _____	116
Mecanismos de la infiltración. _____	117
Resumen de Modelación. _____	121
Conclusiones. _____	125

	Pag.
Capítulo 5: Análisis de Resultados.	
Diagnóstico del Canal Independencia. _____	127
Pérdidas. _____	127
Pérdidas Naturales. _____	128
Pérdidas por Evaporación. _____	129
Pérdidas por Infiltración. _____	130
Pérdidas Técnicas. _____	133
Rescate de Volúmenes de Agua. _____	134
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.	
Conclusiones. _____	137
Recomendaciones. _____	140
Unidades y factores de conversión _____	141
Bibliografía _____	143

Índice de tablas.

	Pág.
Tabla 1.1:	
Usos consuntivos del Agua en México. _____	49
Tabla 1.2:	
Distritos de Riego con mayor superficie de cultivo en México. _____	49
Tabla 1.3:	
Superficie física D.R.014, Río Colorado. _____	77
Tabla 3.1:	
Radiación medida, Estación Agro climatológica No. 3 Mesa de Andrade. _____	85
Tabla 3.2:	
Temperaturas medidas, Estación Agro climatológica No. 3 Mesa de Andrade. _____	85
Tabla 3.3:	
Velocidades medidas, Estación climatológica No. 5 UC-Mexicali. _____	85
Tabla 3.4:	
Precipitación medida por estación de Bataques (CONAGUA 2008). _____	85

	Pag.
Tabla 3.5:	
Inventario de Obras. _____	85
Tabla 3.6:	
Capacidad de los Canales Principales. _____	49
Tabla 3.7:	
Eficiencia en la conducción del Canal Independencia. _____	86
Tabla 4.1:	
Caudales de operación para el Canal Independencia. _____	86
Tabla 4.2:	
Comparación de los resultados la simulación con respecto al proyecto corrida 1. _____	85
Tabla 4.3:	
Comparación de los resultados la simulación con respecto al proyecto corrida 2. _____	85
Tabla 4.4:	
Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____	85
Tabla 4.5:	
Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para para los diferentes Gastos de Operación. _____	85

Tabla 4.6:

Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 85

Tabla 4.7:

Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 85

Tabla 4.8:

Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 85

Tabla 4.9:

Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 85

Tabla 4.10:

Tabla de Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 85

Tabla 4.11:

Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación._____	85
--	----

Tabla 4.12:

Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación._____	85
---	----

Tabla 4.13:

Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación._____	85
---	----

Tabla 4.14:

Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 y Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____	85
--	----

Tabla 5.1:

Volúmenes manejados en el ciclo agrícola 2008-2009._____	85
--	----

Tabla 5.2:

Relación evaporación-gasto recibido de agua. _____	85
--	----

Tabla 5.3:

Relación infiltración-gasto recibido de agua. _____	85
---	----

	Pag.
Tabla 5.4:	
Relación infiltración-gasto recibido de agua. _____	85
Tabla 5.5:	
Pérdidas Técnicas. _____	85
Tabla 5.6:	
Operación actual del Canal Independencia. _____	85
Tabla 5.7:	
Operación en caso de rehabilitación del Canal Independencia. _____	85
Tabla 5.8:	
Pérdidas anuales del Canal Independencia. _____	85
Tabla 5.9:	
Volumen de recuperación anual del Canal Independencia. _____	85
Tabla 5.10:	
Ingresos por venta de agua de recuperación anual del Canal Independencia. _____	85
Tabla 5.11:	
Costos preliminares de la realización del proyecto. _____	85

Índice de figuras.

	Pág.
Figura 1.1:	
Consumo de Agua por Sector a nivel mundial. _____	29
Figura 1.2:	
Usos del agua en México. _____	30
Figura 1.3:	
Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana. _____	66
Figura 1.4:	
Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana. _____	74
Figura 1.5:	
Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana. _____	74
Figura 1.6:	
Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana. _____	74
Figura 1.7:	
Ubicación del D.R.014, Río Colorado. _____	74
Figura 1.8:	
Extensión territorial de D.P del Río Colorado. _____	74
Figura 1.9:	
Cultivo de cebollín. _____	80
Figura 1.10:	
Cultivo de Sorgo. _____	110

	Pag.
Figura 1.11:	
Disponibilidad del Agua en el DR 014, Río Colorado. _____	177
Figura 1.12:	
Usos del Agua en el DR 014, Río Colorado. _____	177
Figura 2.1:	
Principios de Hidráulica. _____	187
Figura 2.2:	
Componentes geométricos de un Canal Trapezoidal. _____	187
Figura 2.3:	
Tipos de Flujo en Canales Abiertos. _____	189
Figura 2.4:	
Variables geométricas para determinar el caudal de infiltración. _____	190
Figura 2.5:	
HEC-RAS menú principal. _____	190
Figura 2.6:	
Metodología utilizada. _____	190
Figura 2.7:	
Base instalada en compuerta km 4+420. _____	190
Figura 2.8:	
Levantamiento desde Bocatomas Norte y Sur. _____	190

	Pag.
Figura 2.9:	
Recogiendo equipo de levantamiento en compuerta km 4+420. _____	191
Figura 2.10:	
Trasladando equipo de levantamiento a compuerta km 13+800. _____	192
Figura 2.11:	
Cruce del canal para sujetar lancha. _____	192
Figura 2.12:	
Sujetando lancha para tomar puntos de levantamiento. _____	193
Figura 2.13:	
Preparar equipo. _____	193
Figura 3.1:	
Extensión Territorial del Municipio de Mexicali. _____	194
Figura 3.2:	
Regiones Hidrológicas para el municipio de Mexicali, B.C. _____	194
Figura 3.3:	
Región Hidrológica número 4. _____	194
Figura 3.4:	
Región Hidrológica número 7. _____	194
Figura 3.5:	
Tipo de suelos en D.R. 014, Rio Colorado. _____	194

Figura 3.6:

Ubicación de las estaciones climatológicas No. 3 Mesa de Andrade operada por SIMARBC y Bataques operada por CONAGUA en el Valle de Mexicali. _____

195

Figura 3.7:

Ubicación de la estación Agroclimatológica, No. 3 Mesa de Andrade. _____

194

Figura 3.8:

Ubicación estación meteorológica de Bataques, Valle de Mexicali. _____

195

Figura 3.9:

Límites de Red Mayor. _____

194

Figura 3.10:

Ubicación del área de estudio. _____

197

Figura 3.11:

Accesos en el Valle de Mexicali. _____

197

Figura 3.12:

Consumos de agua uso Urbano Mexicali. _____

197

Figura 3.13:

Asignación de derechos de riego. _____

197

	Pag
Figura 3.14:	
Agua usada por módulo de riego. _____	195
Figura 3.15:	
Canal Independencia en proceso de terminación. _____	194
Figura 4.1:	
Hidrométricos para el Canal Independencia 2008-2009. _____	195
Figura 4.2:	
Bocatoma Norte Canal Independencia derivado del Canal Alimentador Central. _____	194
Figura 4.3:	
Bocatoma Sur Canal Independencia derivado del Canal Alimentador Central. _____	197
Figura 4.4:	
Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760. _____	197
Figura 4.5:	
Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760. _____	197
Figura 4.6:	
Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760. _____	197

	Pag
Figura 4.7:	
Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al	
26+760. _____	195
Figuras 4.8 y 4.9:	
Bocatomas Sur y alimentación de represo Benassini para el Canal	
Independencia alimentando el tramo de Concreto Hidráulico del Km	
26+955 al 56+623. _____	194
Figura 4.10:	
Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al	
56+623. _____	195
Figura 4.11:	
Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al	
56+623. _____	195
Figura 4.12:	
Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al	
56+623. _____	195
Figura 4.13:	
Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto	
Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de	
Operación. _____	194

Figura 4.14:

Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 195

Figura 4.15:

Correlación de Evaporación calculada y Medida. _____ 194

Figura 4.16:

Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 195

Figura 4.17:

Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 195

Figura 4.18:

Variables geométricas para determinar el caudal de infiltración. _____ 195

Figura 4.19:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 194

Figura 4.20:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico km
13+800._____ 195

Figura 4.21:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico km
13+800._____ 195

Figura 4.21:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico km
13+800._____ 195

Figura 4.22:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km
26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de
Operación.._____ 195

Figura 4.23:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico km
56+466._____ 195

Figura 4.24:

Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico km
56+466._____ 195

Figura 4.25:

Perímetro mojado para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación._____ 195

Figura 4.26:

Perímetro mojado para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación._____ 195

Figura 4.27:

Perfil de elevación para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760. _____ 195

Figura 4.28:

Perfil de elevación para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623. _____ 195

Figura 4.29:

Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 195

Figura 4.30:

Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación. _____ 195

Figura 4.31:

Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del
Km 4+420 al 8+560 para Gasto de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de Operación. _____ 195

Figura 4.32:

Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del
Km 4+420 al 8+560 para Gasto de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de Operación. _____ 195

Figura 5.1:

Variables que intervienen en la conducción de agua en canales
abiertos. _____ 195

Figura 5.2:

Grietas en los taludes del Canal Independencia en km 20+210. _____ 195

Figura 5.3:

Grietas en los taludes del Canal Independencia en km 37+993. _____ 195

RESUMEN

El presente trabajo comprende la identificación de la problemática, en la conducción del agua en red mayor, para el Canal Independencia del Distrito de Riego 014 Río Colorado, teniendo como objetivos evaluar y diagnosticar las condiciones hidráulicas con las cuales opera. Actualmente este canal maneja un volumen de 531 millones de metros cúbicos al año, abasteciendo a los módulos de riego 4, 5, 6, 7, 14, 15, 16 y como punto final a la Ciudad de Mexicali.

Derivado del análisis en la operación, se identificaron los usos urbanos y agrícolas que tiene el agua de este canal así como los meses que más impactaron en la operación. Se detectaron las principales causas en pérdidas de agua y se evaluaron los fenómenos de infiltración y evaporación.

El trabajo incluye la fundamentación teórica y práctica del modelado hidráulico, para la simulación se realizó con el software de HEC-RAS, la estimación del fenómeno de evaporación se determinó utilizando la metodología desarrollada por Penman y para la infiltración se calculó con base en los principios de la Ley de Darcy, apoyándose en los resultados obtenidos de la infiltración en estanques de prueba, estudio que fue realizado como anteproyecto para la construcción del Canal Independencia.

Considero el impacto social y ambiental desarrollándose con el enfoque de ingeniería sistémica y adapto metodologías para la evaluación y planteamiento de soluciones al objeto de estudio, es importante mencionar esto ya que debido al crecimiento acelerado de las ciudades, se requiere un mayor volumen de agua para satisfacer la demanda urbana, sin embargo el agua para los usos agrícolas en el D.R. 014 Río Colorado, el cual es uno de los más grandes que existen en el país, se está viendo amenazado en la disposición de este recurso debido al crecimiento urbano de las ciudades

La simulación hidráulica nos permitió detectar las secciones del Canal Independencia, que presentan mal funcionamiento hidráulico, debido a las condiciones actuales de su material de revestimiento, logrando con esto presentar un diagnostico actual, que servirá de base en la toma de decisiones estratégicas para el abastecimiento de agua en uso agrícola y urbano, así como proponer una metodología, para la evaluación del transporte de agua por gravedad en canales abiertos, la cual pretende contribuir como una herramienta de aplicación, al generar estudios de este tipo, ya que contribuyen a un uso sustentable del agua y con ello alcanzar el objetivo principal, satisfacer la demanda regional del recurso hídrico.

Capítulo 1

IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso de vital importancia para el ser humano y entre mejor uso hagamos de ella, más beneficios se pueden obtener. Existen una serie de causas que impiden el uso eficiente del recurso, entre ellas la infraestructura hidráulica obsoleta, la deficiente medición y control de los volúmenes de agua que se conducen y distribuyen, sin embargo, sólo captamos los efectos finales de estas causas como la pérdida de áreas de cultivo, la falta de recurso para atender los usos no agrícolas que genera fricciones sectoriales, entre otros. Por ello es necesario revisar, adaptar e integrar metodologías para en primer término identificar y definir la problemática específica que pretendemos resolver, continuar con el planteamiento de alternativas de solución y finalmente generar y evaluar prospectivas de los escenarios esperados al aplicar alternativas seleccionadas, comparados con el escenario inercial si no se efectúa ninguna acción.

Para comprender y realizar los objetivos que se plantean, es necesario comprender el entorno en el que interactúan las diferentes variables del objeto de estudio.

Así de esta manera, se comprenderán que factores son los que contribuyen a la disminución o aumento de los resultados esperados del proyecto de investigación, es decir en un análisis de este tipo no intervienen las variables físicas, sino que también influyen aspectos políticos, sociales, ambientales y económicos, los cuales al estudiarlos de manera sistemática nos permitirán entender, desde diferentes enfoques nuestra variable de estudio.

Antecedentes

El consumo mundial de agua ha crecido durante el último siglo a un ritmo dos veces superior al de la población. La escasez de agua afecta a todos los continentes y a más del 40 por ciento de la población de nuestro planeta. Para 2025, 1,800 millones de personas vivirán en países o regiones con una drástica falta de agua, y dos tercios de la población mundial podría encontrarse en condiciones de escasez del líquido (FAO 2007).

Como mayor consumidor de agua en el mundo, el sector agrícola debe encabezar la búsqueda de una solución a la demanda creciente de agua y el impacto potencial que tendrá en los recursos naturales del planeta. La agricultura consume cerca del 70 por ciento del agua dulce que se extrae de los lagos, cursos de agua y acuíferos de todo el planeta (Figura 1.1). Esta cifra se acerca al 95 por ciento en muchos países en desarrollo, donde se encuentran unas tres cuartas partes de las tierras irrigadas del mundo. Los alimentos consumen agua: se necesitan entre 1000 y 2000 litros de agua para producir un kilo de trigo y entre 13 000 y 15 000 litros para producir la misma cantidad de carne de vacuno alimentado con grano. Sin agua, no podemos producir alimentos, y sin ellos, no podemos comer (FAO 2007).



Figura 1.1. Consumo de Agua por Sector a nivel mundial.

Fuente: International Water Management Institute 2002.

Contexto Nacional

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), se tienen registrados los volúmenes concesionados (o asignados) a los usuarios de aguas nacionales tal como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Usos consuntivos del Agua en México.

T1.1 Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción, 2007 (miles de millones de metros cúbicos, m³)			
Uso	Origen		Volumen Total
	Superficial	Subterráneo	
Agrícola ^a	40.5	20.1	60.6
Abastecimiento público ^b	4.2	6.9	11.1
Industria autoabastecida ^c (sin termoeléctricas)	1.7	1.4	3.1
Termoeléctricas	3.6	0.5	4.1
Total	50	28.9	78.9

Fuente: CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua.

En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, que para fines prácticos se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro que corresponden a usos consuntivos, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas, y el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no-consuntivo.

Como se observa en la siguiente gráfica (Figura 1.2), el mayor volumen concesionado para uso consuntivo del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas, de hecho México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo.

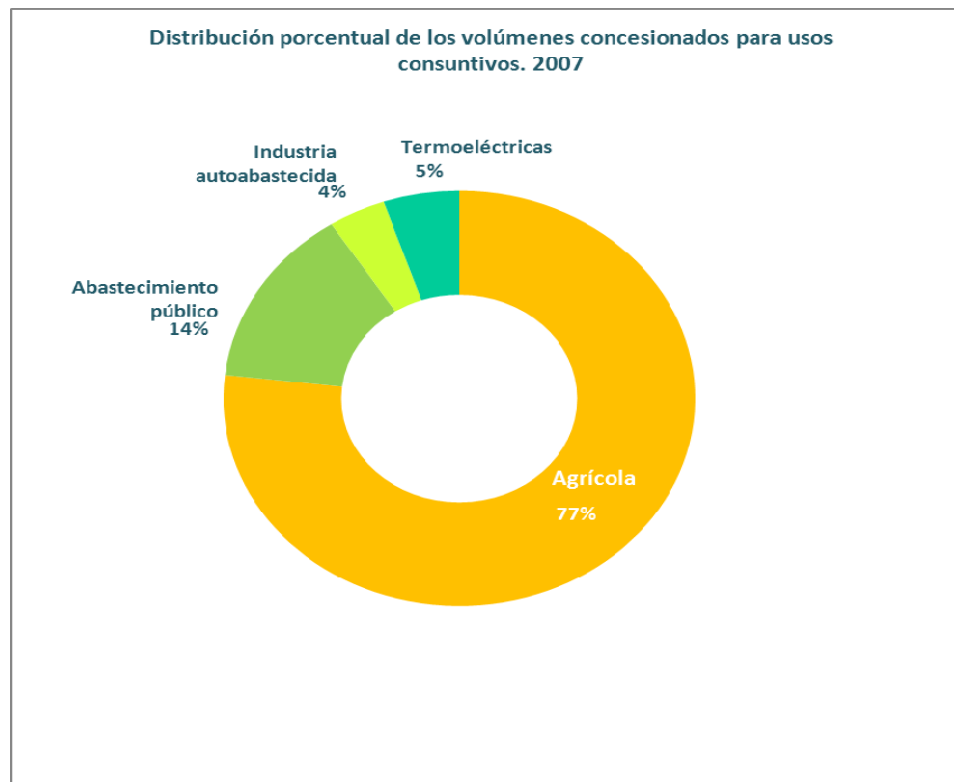


Figura 1.2. Usos del agua en México.

Fuente: Estadísticas del agua en México 2008, CONAGUA.

Contexto Estatal

El Estado de Baja California se localiza al noroeste de México en una extensa zona árida y semiárida en el norte de la Península de Baja California. Las incidencias de precipitación pluvial son bajas y por lo tanto su disponibilidad de agua también es escasa.

Los principales problemas identificados para la región correspondiente a Baja California son los siguientes (Plan Estatal Hídrico, Gobierno del Estado de Baja California 2008).

Inseguridad de abastecimiento futuro de agua a zonas urbanas y rurales.

Baja eficiencia de los sistemas de agua potable y riego.

Sobreexplotación de los acuíferos de la región.

Falta de infraestructura de medición.

Baja cobertura de alcantarillado sanitario.

Contaminación de aguas superficiales.

Deficiente cultura del agua.

Invasión de cauces y zonas federales.

Daños provocados por fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Daño ecológico en el Delta del Río Colorado.

Baja California cuenta con una población actual de 2, 998,900 habitantes y disponibilidad de 3,336 millones de metros cúbicos (Mm³) por año, que se distribuyen 84% para la agricultura, y 8% para uso público urbano y 8% para la industria, con coberturas de agua potable de 95.6% y alcantarillado de 79.0% en el Estado (Plan Estatal Hídrico, Gobierno del Estado de Baja California 2008).

Derivado de estos problemas el Gobierno del Estado de Baja California inicia proyectos para garantizar el abasto de agua y llevarla a más comunidades, donde han decidido diversificar las fuentes de abastecimiento para la costa Pacífico, iniciando la ampliación del Acueducto Río Colorado-Tijuana (Figuras 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6) que permitirá contar con 1.3 m³/s adicionales de agua, la cual es obtenida de este Distrito de Riego, esto significa que se extraerían más de 41 millones de metros cúbicos anuales para abastecer a la ciudad de Tijuana (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).



Figura 1.3. Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana.
Fuente: Comisión Estatal del Agua 2008.



Figura 1.4. Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana.
Fuente: Comisión Estatal del Agua 2008.



Figura 1.5. Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana.

Fuente: Comisión Estatal del Agua 2008.



Figura 1.6. Ampliación del Acueducto Río Colorado -Tijuana.

Fuente: Comisión Estatal del Agua 2008.

Contexto Local

El Distrito de Riego número 14 se ubica en el extremo noroeste de la República Mexicana. Limita al norte con los Estados Unidos de América en una línea fronteriza colindando con el estado de California y con el estado de Arizona, tal como se muestran en las Figuras 1.7 y 1.8.



Figura 1.7: Ubicación del D.R.014, Río Colorado.

Fuente: SIGA-2008 CONAGUA

El Distrito de Riego 014 Río Colorado está ubicado en su mayor parte en el municipio de Mexicali que pertenece al estado de Baja California y este se extiende hasta el municipio de San Luis Río Colorado el cual pertenece al Estado de Sonora.

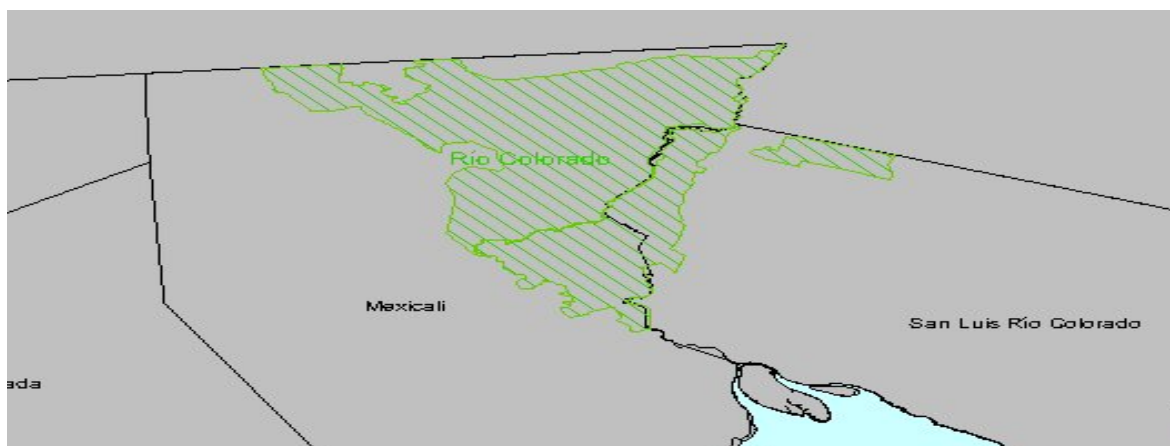


Figura 1.8: Extensión territorial de D.P del Río Colorado.

Fuente: SIGA-2008 CONAGUA.

Actualmente este Distrito de Riego es uno de los más representativos del país ya cuenta con una gran extensión territorial que alcanza las 327 mil hectáreas de superficie bruta, de las cuales 250 mil hectáreas presentan características de explotación potencial agrícola, mostrando esta comparación en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Distritos de Riego con mayor superficie de cultivo en México.

Ubicación y superficie de los Distritos de Riego					
No.	Clave	Distrito de Riego	Región Hidrológico-Administrativa	Entidad federativa	Superficie Total (hectáreas)
1	025	Bajo Río Bravo	VI Río Bravo	Tamaulipas	248 001
2	041	Río Yaqui	II Noroeste	Sonora	232 944
3	010	Culiacán-Humaya	III Pacífico Norte	Sinaloa	212 141
4	014	Río Colorado	I Península de Baja California	Baja California y Sonora	208 805

Fuente: Estadísticas del Agua en México edición 2008.

Los cultivos más representativos de esta zona son: Algodón, Trigo, Alfalfa, Cebolla, Hortalizas, e Invernaderos, tal como se ve en las Figuras 1.9 y 1.10 (Estadística Agropecuaria SEFOA 2009).



Figura 1.9. Cultivo de cebollín.

Fuente: Este estudio.



Figura 1.10. Cultivo de Sorgo.

Fuente: Este estudio.

Ante la situación de optimizar el empleo del agua, en los diferentes sectores se han realizado diferentes trabajos de investigación para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico a nivel nacional, estatal y municipal, en donde estas investigaciones con sus correspondientes estudios, proporcionan información para la toma de

decisiones y podemos ver que en su mayoría abarcan diferentes aspectos, estas conclusiones nos muestran un panorama general de la problemática presente en nuestro territorio:

Infraestructura hidroagrícola obsoleta, baja eficiencia del agua de riego, falta de estructuras de control y medición del agua de riego, conservación en la red de distribución de canales (CEA 2008), también se necesitan sistemas de monitoreo y operación remota y continuar con la supervisión de los puntos críticos de la red de distribución a cargo de la Sociedades de Responsabilidad Limitada (Ruiz, Navarro, Paredes, Andrade, Anguiano, Delgado y Ramírez 2005).

Se puede afirmar que el manejo del agua para el riego en México es deficiente y que las pérdidas de agua durante la conducción, en los módulos y distritos de riego, son considerables concluyendo en que la eficiencia en el uso del agua durante su aplicación a escala de parcela por los usuarios es baja, debido principalmente a que no hay incentivos para que lleven a cabo acciones que permitan mejorar dicha eficiencia (Mejía, Palacios, Exebio, Santos, 2002).

Falta de Elaboración de manuales de procedimientos, uso y funcionamiento de infraestructura de medición (Ramírez, Argueta, Ruiz y Olvera, 2002).

Situación Actual

La zona de influencia de este Distrito, comprende una superficie física total de 327,020 hectáreas, de la cual se tiene una superficie compactada 250,000 hectáreas, y de este recurso existe una superficie registrada en el padrón de usuarios con 213,455 hectáreas, así como se aprecia en la Tabla 1.3 (SEFOA, 2009).

Tabla 1.3. Superficie física D.R.014, Río Colorado.

Superficie	hectáreas (ha)
Física total	327,020.00
Compactada	250,000.00
Registrada por usuarios	213,455.00

Fuente: SEFOA 2009

Se tiene una disponibilidad del agua (Figura 1.11), la cual en su mayor parte llega a través del Río Colorado como agua superficial, mediante el Tratado Internacional que existe entre México y Estados Unidos de América, en un volumen de 1 850.23 millones de metros cúbicos anuales y el restante del agua se obtiene de forma subterránea y se extrae de los pozos federales con 425 instalados en un volumen de 500 millones de metros cúbicos anuales, los pozos particulares con 235 instalados en un volumen de 200 millones de metros cúbicos anuales y los pozos de ubicados en la Mesa Arenosa con 62 instalados por un volumen 197.36 millones de metros cúbicos (CONAGUA 2008).



Figura: 1.11. Disponibilidad del Agua en el DR 014, Río Colorado.

Fuente: CONAGUA 2008.

Por último tenemos que para los usos del agua (Figura 1.12) son varios sectores que dependen de este recurso siendo el agrícola el que más volumen requiere para sus actividades con un volumen de 2 512.24 millones de metros cúbicos anuales y después le siguen las ciudades de Mexicali con 82 millones de metros cúbicos anuales, Tijuana con 80 millones de metros cúbicos anuales, el Valle de Mexicali con 30 millones de metros cúbicos anuales, San Luis Río Colorado con 23 millones de metros cúbicos anuales, Ensenada con 9 millones de metros cúbicos anuales, Tecate con 3.35 millones de metros cúbicos anuales, finalizando con el uso industrial del agua el cual utiliza 8 millones de metros cúbicos anuales.(CONAGUA 2008).

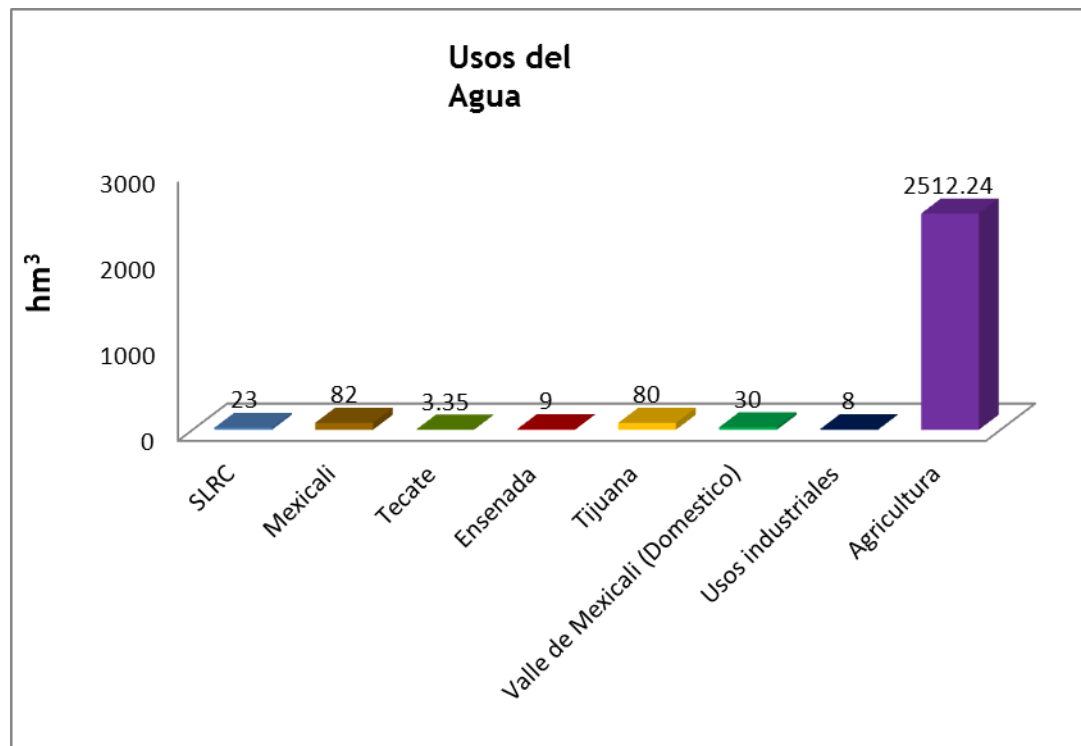


Figura 1.12. Usos del Agua en el DR 014, Río Colorado.

Fuente: CONAGUA 2008.

Planteamiento del Problema

Dentro del conjunto de problemas pertenecientes a la distribución y conducción del agua en el DR 014, Río Colorado se presenta una baja eficiencia en el uso del agua tanto en red mayor y parcelaria, una medición inadecuada del agua, contar con condiciones topográficas planas, la infraestructura está dañada así como obsoleta e incompleta en red mayor así como en red lateral, el sistema de pozos en su mayor parte ha alcanzado su vida útil y finalizando en que la explotación de aguas del acuífero esta fuera de control.

Para poder evaluar e identificar las condiciones actuales del funcionamiento de la red mayor de manera preliminar, se seleccionó el Canal Independencia del D.R. 014, Río Colorado. Delimitar esta zona y obtener las características climatológicas, hidráulicas del canal e hidrológicas de la zona fue la base para comprender la dinámica actual.

Debido a los sectores que dependen del agua de este canal y al no contar estudios de este tipo fue necesario cuantificar el volumen de agua perdido de este canal. Obtener esta información es fundamental para estimar las perdidas por infiltración y evaporación en canales abiertos.

Hipótesis

Las pérdidas actuales en la red mayor del Distrito de Riego 014, Río Colorado, representan el 9.7% (265 millones de metros cúbicos anuales) del agua disponible en la región (2,747 millones de metros cúbicos anuales) y se considera que las debidas a la infiltración y evaporación en los canales de conducción representan el

46% (122 millones de metros cúbicos anuales). Es posible mediante análisis sistemático de este problema precisar las causas de estas pérdidas, cuantificando las mismas y por consiguiente seleccionar alternativas de solución tecnológica que permitan recuperar por lo menos el 10% (12 millones de metros cúbicos anuales) de estas pérdidas, los cuales podrán ser destinados para: Abrir nuevas áreas de cultivos y satisfacer otros usos distintos a la agricultura, asegurar el abastecimiento futuro de agua a zonas urbanas y rurales o bien mantener el equilibrio del acuífero y las corrientes superficiales. Las metodologías y soluciones aquí planteadas podrán ser generalizadas para otros Distritos de Riego de la región.

Justificación del Proyecto

El proyecto planteado es importante por los siguientes puntos:

El trabajo se refiere a la problemática que abarca tanto la parte de fundamentación teórica y práctica del modelado hidráulico, pues plantea en buscar alternativas de solución a los problemas de conducción y distribución del agua en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, del cual dependen los diferentes sectores que están ubicados en el estado de Baja California, en donde el sector agrícola es uno de los que demanda de este recurso y este se encuentra en el valle de Mexicali.

El trabajo permite visualizar el impacto ambiental y social, pues evaluará y propondrá soluciones a los problemas de la conducción del agua en la red mayor, sin tomar en cuenta los problemas que resultan de trámites administrativos o de las instituciones que manejan este recurso.

El estudio tiene un impacto tecnológico, al aplicar soluciones de ingeniería al proceso de conducción del agua en la red mayor, estableciendo una metodología para la evaluación y resolución a la problemática que se detecte.

El estudio contribuye al uso sustentable y eficiente del agua, ya que generará soluciones para la conducción del agua en la red mayor, beneficiando a usuarios de los demás sectores, en donde el agua que se rescate puede ayudar a satisfacer a la demanda regional, logrando con esto el incremento del conocimiento tecnológico para los problemas de este tipo en la región.

El estudio incide en un aspecto importante de la producción agrícola así como de la disponibilidad de agua regional, pues la siembra de cultivos depende totalmente del agua, ya que sin este recurso no es posible la elaboración de alimentos y otros productos que se requieren.

Objetivos.

Proponer, evaluar y seleccionar alternativas de solución, para rescatar volúmenes de agua en la Red Mayor del Distrito de Riego 014, Río Colorado, que actualmente se pierden por infiltración y evaporación en los canales de conducción y distribución, permitiendo lograr un mejor uso sustentable del recurso.

Las soluciones serán de tipo ingenieril y para ello se requiere evaluar la magnitud e importancia de los volúmenes que se pierden, discriminándolos espacial y temporalmente, seleccionando las alternativas que prometen el mayor impacto en la disminución de pérdidas.

Se estima que actualmente se pierde 34% por infiltración y 12% por evaporación en la Red Mayor y se pretende proponer alternativas de solución para disminuir en 10 % estas pérdidas.

Se considera que la obsolescencia de las estructuras hidráulicas en su diseño y operación es la causa principal de las pérdidas referidas y que estas estructuras son factibles de mejora tecnológica para lograr la disminución de las pérdidas propuestas. Las contribuciones que se obtendrán es el desarrollo de herramientas para el diseño, evaluación, operación de la red mayor así como incrementar la eficiencia en la conducción del agua y rescatar volúmenes de agua aprovechables para la región.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO.

Marco Conceptual.

Principios de Hidráulica.

Los principios básicos de la hidráulica son tres: a) Conservación de masa o continuidad, b) conservación de la energía y, c) Conservación de la cantidad de movimiento.



Figura 2.1. Principios de Hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Además de los principios de hidráulica, existen otra serie de caracterizaciones físicas del agua, que han sido determinadas para complementar estos principios, denominadas relaciones constitutivas. Algunas de ellas son densidad, velocidad, gasto, esfuerzo cortante, cargas hidráulicas, presión, número de Reynolds y Froude (IMTA 2003).

Propiedades del Agua y de Conductos.

El agua posee ciertas propiedades físicas que la distinguen de los otros elementos naturales y que se pueden cuantificar mediante el uso de parámetros. Estas propiedades son inherentes al líquido y se mantienen, aún si el agua se encuentra en movimiento o en reposo (IMTA 2003).

Entre las principales propiedades físicas del agua se encuentran las siguientes:

Peso específico, γ .- Es el peso del agua en un volumen unitario, el valor estándar de γ para el agua vale 1000 kg/m³.

Densidad, ρ .- Es una medida de la cantidad de masa que contiene un volumen de agua, para una temperatura de 20 °C su valor es de 101.4 kg-s²/m⁴. La densidad y el peso específico se relacionan con la aceleración de la gravedad g , mediante la ecuación:

$$\gamma = \rho g \quad \text{Ec. 2.1}$$

Viscosidad dinámica, μ .- Es una medida de su resistencia a fluir, como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas, para agua a 20°C de temperatura μ es igual a 1 kg-s/m².

Viscosidad cinemática, ν .- está definida como la relación entre la densidad dinámica μ entre el peso específico del agua; el valor para agua a una temperatura de 20°C es de 0.000001 m²/s.

Concepto de Gasto o Caudal.

El gasto o caudal Q , es una cantidad hidráulica que se define como el volumen (V) de agua que pasa por una sección de un conducto en un determinado tiempo (t), es decir:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Normalmente, el agua en movimiento se mide en los conductos que la transportan. Estos conductos llamados hidráulicos pueden ser naturales, como por ejemplo los

cauces de los ríos o artificiales como las tuberías y canales. La geometría de los conductos hidráulicos está definida por su longitud, diámetro, pendiente y el área de su sección transversal.

Cuando el agua circula por estos conductos, sus geometrías se relacionan con el agua y adquieren importancia otras características, como el radio hidráulico y el perímetro mojado del conducto (IMTA 2003).

Perímetro mojado, P_m .- Es la longitud de la sección transversal que se encuentra en contacto con el agua.

Radio hidráulico, R_h .- Es igual al área de la sección transversal del conducto dividida entre el perímetro mojado, sus unidades son de longitud (metros, centímetros, etc.) y se abrevia con la letra R_h .

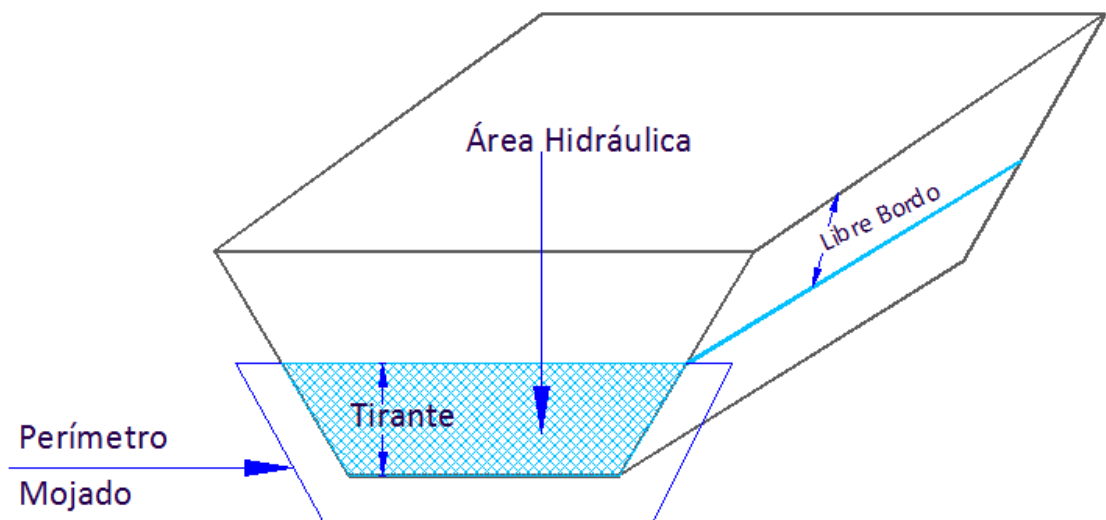


Figura 2.2. Componentes geométricos de un Canal Trapezoidal.

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de Continuidad.

El agua es un fluido prácticamente incompresible y el principio de continuidad de un flujo establece que “La masa de un fluido incompresible que atraviesa cualquier sección de un conducto en el tiempo, permanece constante” (IMTA 2003).

Principio de Conservación de la Energía Hidráulica.

El Principio de conservación de la energía postula que la energía no se crea ni se destruye, solo tiene transformaciones. La energía contenida en el agua en reposo se denomina energía potencial y cuando está en movimiento se llama energía cinética. Las transformaciones de energía en el agua generan su movimiento y la conservan en la dirección del flujo (IMTA 2003).

Flujo en Canales Abiertos.

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo son similares en muchos aspectos pero se diferencian en un aspecto importante. El flujo en un canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en una tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe de llenar completamente el conducto.

Un canal abierto puede considerarse como una tubería descubierta, sometida a la presión atmosférica, cuyos contornos limitan la corriente de un fluido. Los tipos de flujo que se esperan en un conducto de estas características se resumen en la siguiente figura (Figura 2.3), cada uno de ellos se define por propiedades como su profundidad y velocidad media. Si la altura del fluido no varía se dice que se trata de un flujo permanente, si por lo contrario este parámetro cambia se considera un flujo no permanente (Ven T. Chow. 1994).

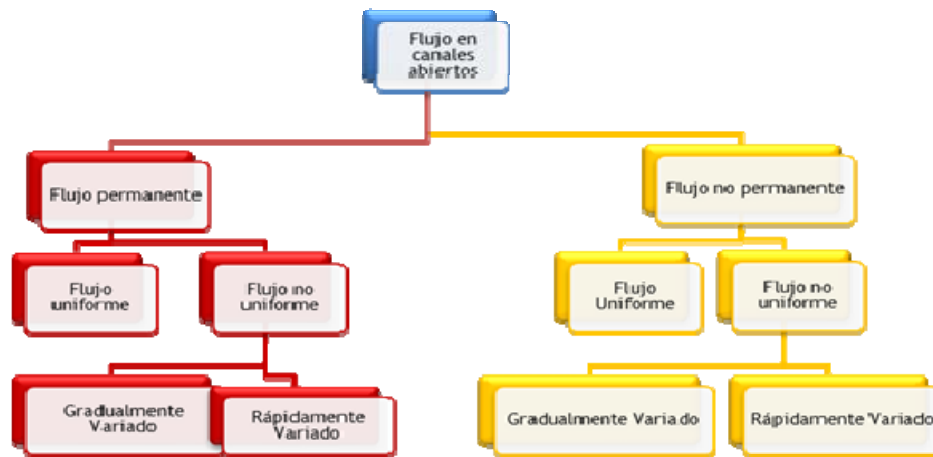


Figura 2.3. Tipos de Flujo en Canales Abiertos.

Fuente: Elaboración propia basado en esquema (Hidráulica de canales abiertos por Ven T. Chow. 1994).

Evaporación.

La evaporación es el resultado del proceso físico, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando, directamente, a la atmosfera en forma de vapor. Existen diferentes opciones para estimar el valor de la evaporación, como son: Métodos Teóricos y Formulas semi- empíricas para cálculo de evaporación desde superficies de agua libre.

Para el desarrollo de este trabajo se basó en la fórmula de Penman la cual es una formula semi-empírica y este modelo se construye a partir de datos climatológicos. Su metodología de cálculo une a los modelos: Balance de energía y Aerodinámico derivando de ambos el modelo combinado o de Penman como se muestra en la Ecuación 2.3 (Custodio Llamas 1983).

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad \text{Ec. 2.3}$$

Infiltración.

El cálculo de la pérdida por infiltración de agua en el Canal Independencia, se basó en los resultados obtenidos de investigaciones realizadas en estanques de prueba, que fueron contruidos en tramos reales de canales representativos, en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, B.C. Este trabajo fue realizado por el Dr. Raúl Vicente Orozco Santoyo con los criterios que establece el Buró de Reclamación de los Estados Unidos (USBR), en donde dichos estudios sirvieron de base para la construcción de este canal en el período de 1971 a 1973.

La ecuación establecida para estimar el caudal de infiltración es la siguiente:

$$Q_f = R(B + b)dL \quad \text{Ec. 2.4}$$

y sus variables geométricas que contiene la Ecuación 2.4 se ilustran en la Figura 2.4:

Q_f = Caudal de Infiltración
B = Ancho en la Superficie del Agua
L = Longitud del Tramo Considerado
d = Tirante de Operación
b = Proyección Horizontal del Talud
R = Valor de Perdida Unitaria

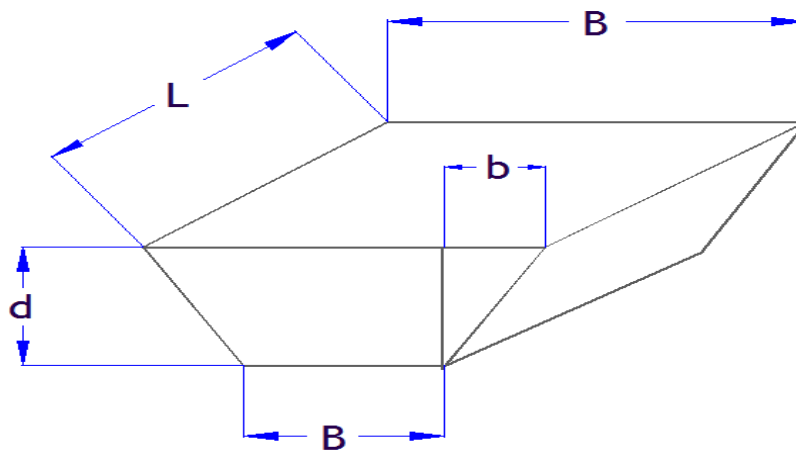


Figura 2.4. Variables geométricas para determinar el caudal de infiltración

Fuente: Elaboración propia.

Relación entre el coeficiente de permeabilidad (k), la pérdida unitaria por infiltración (R) y el espesor del revestimiento (e).

La relación entre el coeficiente de permeabilidad (k), la pérdida unitaria por infiltración (R) y el espesor del revestimiento (e), se ilustra a continuación:

$$Qf = R(B + b)Lk \frac{d}{e} \quad \text{Ec. 2.5} \quad \text{USBR}$$

$$Qf = AKi \quad 2.5 \quad \text{Ec. 2.6} \quad \text{Darcy}$$

$$Qf = AKi = (B + b)Lk \frac{d}{e} \quad \text{Ec. 2.7}$$

i = gradiente hidráulico = tirante (d) / espesor (e)

Al igualar las ecuaciones de USBR y Darcy, resulta:

$$k = Re \quad \text{Ec. 2.8} \quad \text{RVOS}$$

Eficiencia de Conducción.

Se estima que en promedio en los Distritos de Riego del país se pierde un 40% del agua en la conducción; es decir la eficiencia media de conducción es del orden del 60%. No obstante, debe recordarse que no toda el agua se desperdicia, ya que parte va a los acuíferos y posteriormente puede ser nuevamente aprovechada; sin

embargo, en los Distritos costeros, la mayor parte del agua perdida se va hasta el mar, sin que sea posible su utilización.

Las pérdidas en conducción pueden subdividirse de acuerdo a su origen en: a) por infiltración; b) por evaporación; c) por manejo del agua en la red de distribución (Palacios-Vélez 1991).

Modelo de simulación hidráulica.

El procedimiento de cálculo está basado en la solución de la ecuación de energía unidimensional evaluando las pérdidas con la ecuación de Manning. Los perfiles de la superficie de agua se calcularon de una sección a la siguiente resolviendo la ecuación de energía por procedimientos iterativos.

Para tal fin se utilizó el paquete de cómputo Hidrologic Engineering Center-River Analysis versión 4.0 de Marzo del 2008. HEC-RAS es un sistema integrado de paquetes de cómputo diseñado para uso interactivo multitareas. El sistema está constituido por interface gráfica, análisis hidráulico por componentes, capacidad de almacenamiento y manejo de datos, y facilidades de reporte escrito, tabular y gráfico.

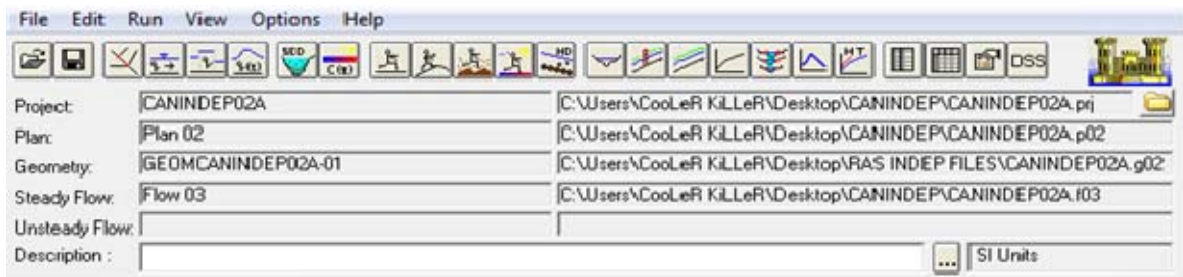


Figura 2.5. HEC-RAS menú principal.

Fuente: Este estudio.

Descripción general del modelo matemático empleado.

El paquete de cómputo HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales para redes de canales naturales o construidos.

En la sección para el cálculo de los perfiles de la superficie del agua para flujo estable gradualmente variado, el sistema es capaz de modelar una red de canales un sistema dendrítico o un simple ramal, y es capaz de modelar los perfiles de superficie del agua en regímenes de flujo subcrítico, supercrítico o mezclados.

El procedimiento de cómputo está basado en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía por fricción son evaluadas con la ecuación de Manning y las pérdidas por contracción y expansión mediante coeficientes de resistencia aplicados sobre el cambio de la carga de velocidad. La ecuación de momentum se utiliza cuando el perfil de la superficie del agua varía rápidamente, como puede ocurrir en el cálculo a régimen de flujo mixto, hidráulica de puentes y en la evaluación de perfiles en zonas de confluencia.

Entre los aspectos especiales de la sección de flujo estable se incluyen el análisis de planes múltiples, el cálculo de varios perfiles y el análisis de puentes y alcantarillas con aberturas de diferentes tipos.

Los perfiles de la superficie del agua son calculados de una sección a la siguiente resolviendo la ecuación de energía con un procedimiento iterativo denominado el método estándar de escalón. La ecuación de energía puede ser expresada por:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 V_2^2 / 2g = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g + h_e \quad \text{Ec. 2.9}$$

Dónde:

Y Tirante de agua en las secciones

Z Elevación del fondo del canal principal

V	Velocidad media
α	Coeficiente de corrección por energía cinética
g	Aceleración de la gravedad
h_e	Pérdida de carga

La pérdida de carga (h_e) entre dos secciones transversales se integra por pérdidas de fricción y pérdidas por expansión y contracción.

$$h_e = LS_f + C\{\alpha_2 V_2^2/2g - \alpha_1 V_1^2/2g\} \quad \text{Ec 2.10}$$

Dónde:

L	Longitud ponderada entre secciones
S_f	Pendiente de fricción representativa entre dos secciones
C	Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

La longitud ponderada entre secciones es calculada como

$$L = (L_{bizq}Q_{bizq} + L_{can}Q_{can} + L_{bder}Q_{bder}) / (Q_{bizq} + Q_{can} + Q_{bder}) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Dónde:

L	Longitud entre secciones
bizq	Banco izquierdo
can	Canal
bder	Banco derecho
Q	Promedio aritmético del gasto entre secciones

La determinación de la capacidad total de transporte y el coeficiente de velocidad para las secciones transversales requieren que el flujo sea dividido en unidades para las cuales la velocidad está uniformemente distribuida. La aproximación usada

por HEC-RAS es subdividir el flujo en áreas usando como criterio de división las zonas transversales donde ocurre un cambio del coeficiente de Manning (n). La capacidad de transporte es calculada para cada subdivisión con la siguiente forma de la ecuación de Manning (unidades inglesas)

$$Q=KS_f^{1/2} \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$K=(1.486/n)AR^{2/3} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Dónde:

- K Capacidad de transporte para la subdivisión
- n Coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión
- A Área de flujo para la subdivisión
- R Radio hidráulico para la subdivisión (área/perímetro mojado)

La capacidad total de transporte es la suma de las capacidades individuales.

El flujo en el canal principal no es subdividido excepto cuando el coeficiente de rugosidad cambia en el área del canal. El programa determina si la porción principal del canal de la sección transversal puede ser subdividida o si utiliza un valor compuesto (n_c) para el canal entero, utilizando como criterios los siguientes: Sí el talud es más pronunciado que 5H/1V y el canal principal tiene más de un valor de n, utiliza un valor compuesto de n.

Para la determinación de n_c , el canal principal es dividido en N partes de perímetro mojado y valor de n conocidos:

$$n_c=[\{\sum(P_i n_i^{1.5})\}/P]^{2/3} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Para una elevación dada de superficie de agua la energía media se obtiene calculando una energía ponderada en el flujo de las tres secciones que componen el canal principal.

El coeficiente de corrección de energía cinética es obtenida por:

$$\alpha V^2/2g = [Q_1 V_1^2/2g + Q_2 V_2^2/2g] / [Q_1 + Q_2] \quad \text{Ec. 2.15}$$

En general:

$$\alpha = [Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2] / Q V^2 \quad \text{Ec. 2.16}$$

La pérdida por fricción es evaluada como el producto de S_f y L como se mostró anteriormente.

La pendiente de fricción en cada sección es calculada por:

$$S_f = [Q/K]^2 \quad \text{Ec. 2.17}$$

Existen varias ecuaciones disponibles para S_f como la ecuación de capacidad de transporte media, la ecuación media de pendiente de fricción, la de pendiente de fricción media geométrica o la media armónica, utilizando normalmente la de capacidad de transporte media:

$$S_f = [(Q_1 + Q_2) / (K_1 + K_2)]^2 \quad \text{Ec. 2.18}$$

El programa mantiene la opción para el usuario de seleccionar las distintas ecuaciones.

Las pérdidas por contracción y expansión son evaluadas por:

$$h_o = C \left| \alpha_1 V_1^2 / 2g - \alpha_2 V_2^2 / 2g \right| \quad \text{Ec. 2.19}$$

El programa asume que ocurre una contracción cuando la carga de velocidad aguas abajo es mayor que aguas arriba y viceversa.

En el procedimiento de cálculo la elevación de la superficie del agua en una sección transversal es determinada por una solución iterativa:

1. Se asume una elevación de la superficie del agua en la sección transversal aguas arriba o aguas abajo dependiendo si el perfil es subcrítico o supercrítico.
2. Con base en el valor asumido se determina la capacidad total de transporte y la carga de velocidad.
3. Con los valores del paso anterior se calcula S_f y se resuelve la ecuación para h_e
4. Con los valores de 2 y 3 se resuelve la ecuación para la elevación de la superficie
5. Se compara el valor calculado de elevación de la superficie del agua contra el asumido y se repite el procedimiento hasta que la diferencia es menor a 3 mm o la tolerancia definida por el usuario.

El criterio para asumir la elevación del agua varía de iteración a iteración, en la primera se asume la proyección de la sección previa, en la segunda es el valor asumido más el 70% del error calculado, mientras que en las iteraciones subsecuentes se utiliza el método de la secante.

$$WS_1 = WS_{1-2} * Err_Asum / Err_Diff \quad Ec. 2.20$$

El cambio de una iteración a la siguiente es restringida a un máximo de $\pm 50\%$ del asumido en la anterior. Si Err_diff es menor que $1.0E-2$ el método de la secante no es utilizado y el programa utiliza un nuevo valor tomando el promedio de los supuestos y calculados en la iteración previa.

El programa es limitado a un máximo de 20 iteraciones para balancear la elevación de la superficie del agua, si el número máximo de iteraciones es alcanzado el programa calcula entonces un tirante crítico. El programa verifica entonces si el error asociado con el error mínimo reportado está dentro de la tolerancia pre-establecida (0.1 m) . Si el error mínimo tiene un error asociado menor que la tolerancia y el tirante está en el lado correcto del tirante crítico, se utiliza este valor como respuesta final y deja un mensaje de advertencia. Si el error es mayor o el tirante no está en el régimen correcto, el programa usa el tirante crítico como solución final y envía un mensaje de advertencia. El criterio es que el error mínimo es la solución más probable si está en el rango correcto de régimen de flujo. Esto solo se utiliza para permitir continuar el programa el cálculo de perfiles, ninguna de estas soluciones se considera correcta y se envían mensajes de alerta. Esto puede deberse por un espaciamiento inadecuado de las secciones, datos incorrectos en las secciones o cuando el programa trata de calcular en un régimen de flujo que no es el que prevalece en ese momento.

La determinación del tirante crítico en una sección se realiza cuando:

1. Se especifica un régimen supercrítico
2. El cálculo de tirante crítico es requerido por el usuario

3. Existe una condición límite que debe ser verificada
4. La verificación del número de Froude para un perfil subcrítico
5. El programa no puede balancear la ecuación de energía.

La carga total de energía en una sección es definida por:

$$H = WS + \alpha V^2 / 2g \quad \text{Ec. 2.21}$$

El tirante crítico es la elevación para la cual la carga total de energía es mínima:

El programa calcula el tirante crítico por el método de la secante o por el método parabólico, este último es el normalmente utilizado.

Cuando la elevación del agua pasa a través de un tirante crítico, se considera que la ecuación de energía no es aplicable, y entonces es aplicada la ecuación de momentum.

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad \text{Ec. 2.22}$$

El objetivo principal del simulador para este caso es simple: calcular las elevaciones del espejo del agua en cualquier punto de interés para valores dados de flujo. Los datos requeridos para realizar tales cálculos se pueden clasificar en datos geométricos (modelo geométrico) y datos de flujo en estado estable.

Los datos geométricos básicos consisten en establecer la conectividad del sistema, los datos de las secciones transversales, las distancias entre secciones, los coeficientes de pérdida de energía por fricción, contracción y/o expansión, la

información de los puntos de unión de corrientes y los datos de las estructuras hidráulicas.

El modelo geométrico requiere un trazo de cada corriente, ramal o afluente que constituye el sistema bajo análisis. El trazo requiere las coordenadas en plano horizontal y las elevaciones mostrando principalmente los puntos de inflexión. Aún cuando no es imperativo, si se define espaciar secciones a cada 40 m por ejemplo, se puede utilizar la cota mínima o fondo de las secciones para establecer las coordenadas del trazo.

Para cada corriente en el sistema existe un identificador único (normalmente un nombre como Independencia) y cuando se alimentan los demás datos, son asociados a este identificador. Por ejemplo, cada sección transversal debe pertenecer a una corriente (definida por el identificador) y una posición en la corriente (definida por la estación).

La información topográfica de trazo de cota mínima y de secciones, fue revisada y organizada para respetar las convenciones del paquete de cómputo anterior en cuanto al orden de lecturas de datos para la simulación hidráulica.

La conectividad de las corrientes es muy importante para que el modelo entienda como proceden los cálculos de una corriente a la siguiente, y estas corrientes son "dibujadas" de aguas arriba a aguas abajo lo cual se considera como una dirección de flujo positiva.

El límite geométrico para el análisis hidráulico en corrientes naturales, se especifica en términos de los perfiles de la superficie del terreno o secciones transversales y las distancias entre ellas. Las secciones transversales se localizan en intervalos a lo largo de la corriente y deben ser aproximadamente perpendiculares a las líneas de flujo esperadas.

Cada sección transversal en un juego de datos de HEC-RAS se identifica por el nombre de la corriente y el número de estación en la corriente. La sección se describe por las coordenadas horizontales perpendiculares al trazo y las elevaciones correspondientes desarrollándose de izquierda a derecha viendo aguas abajo. El sistema numérico identificador (normalmente el cadenamiento) debe ser consistente. El modelo asume que el número más alto está aguas arriba, y el número menor aguas abajo dentro de cada corriente, y cada corriente puede ser inicializada a partir de cualquier número manteniendo la convención anterior. El programa considera que el valor mínimo de la coordenada horizontal en una sección se encuentra a la izquierda de la corriente y que el valor máximo dentro de cada sección se ubica a la derecha de la corriente.

Las versiones actuales del HEC-RAS permiten importar archivos tipo GIS para construir el modelo geométrico, o bien alimentar el trazo de la corriente y los datos de las secciones manualmente con coordenadas relativas o con coordenadas UTM.

Utilizando HEC-GEORAS la información topográfica contenida en los archivos de cota mínima y secciones transversales mencionados anteriormente, es transformada en un archivo formato tipo GIS, de tal forma que la geometría puede ser exportada directamente al sistema del HEC-RAS.

El modelo geométrico integrado al HEC-RAS es revisado y corregido para considerar los límites de cada sección en cuanto a las cotas que representan la margen izquierda y derecha (bancos) de la sección para controlar las áreas permitidas de flujo de la sección.

Así mismo se evitan por edición, eliminación y/o interpolación las secciones que presentan problemas de cruzamiento en sus proyecciones con otras secciones en los cambios bruscos de dirección del Canal.

Esto implica que una vez alimentado el archivo tipo GIS (.geo) este puede ser editado para ajustarlo lo más posible a las condiciones reales del terreno compatibles con los requerimientos del modelo y convertirlo en un modelo geométrico específico, con lo cual un archivo tipo GIS puede generar más de un modelo geométrico.

Utilizando los gastos de cálculo seleccionados, las pendientes medias del terreno natural en su cota mínima, las distancias normalizadas entre secciones y la geometría de cada sección, se simuló el comportamiento hidráulico para obtener los perfiles de las superficies de agua para flujo estable gradualmente variado. El sistema permite seleccionar en condiciones de flujo subcrítico, supercrítico y mixto, en este caso, se simuló el caso considerando una condición mixta.

Validación.

Una vez construido el modelo geométrico se procede a fijar y a ajustar los parámetros del mismo. Este proceso se denomina calibración del modelo. Los parámetros de calibración de modelo son los coeficientes de rugosidad de los dos tramos del Canal Independencia. La calibración de los parámetros del modelo se realizará utilizando información de los planos de proyecto.

Una vez calibrado el modelo, se procede a la verificación de la calibración, que consiste en simular el caudal máximo de diseño.

Si el libre bordo simulado y su tirante se ajustan bastante bien a las especificaciones de proyecto, el modelo ha sido bien calibrado, de lo contrario, deberá regresarse a la calibración y repetir el proceso.

Materiales.

Para la realización de este proyecto se requirieron: 1) Materiales para trabajo de gabinete y 2) Materiales para trabajo de campo.

Materiales para trabajo de gabinete.

Se llevó a cabo la interpretación de los planos de proyecto del Canal Independencia, los cuales fueron proporcionados por el departamento de proyectos de CONAGUA, con esta información sirvió de base para realizar el desarrollo de las actividades a realizar para el trabajo de campo, posteriormente se relacionaron con las cartas geográficas elaboradas por el INEGI, las cuales sirven de referencia para realización de este tipo de estudios.

Durante el trabajo de gabinete los manuales que se utilizaron principalmente fueron para el desarrollo de la simulación hidráulica del Canal Independencia y son los siguientes, Arc-Gis, Hec-GeoRas, Hec-Ras.

Para llevar a cabo el nuevo análisis de simulación hidráulica se requirieron los hidrométricos del Canal Independencia, esta información se consiguió en la primera unidad de riego y fue de suma importancia, ya que con estos datos se conocieron los caudales mínimos y máximos de operación de dicho canal así como en que estación del año se presentan las condiciones mencionadas.

El trabajo de gabinete se realizó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UABC con sede en Mexicali.

Materiales para trabajo en campo.

Este tipo de trabajo consistió en el control de líneas y niveles, fue necesario entender bien el conjunto de puntos exactos, líneas y planos a partir de los cuales

se realizaron mediciones y siempre las elevaciones de las estructuras hicieron referencia a un sistema de bancos de nivel establecidos cerca de la zona de estudio.

Equipo utilizado:

1. GPS Topográfico
2. Libreta electrónica
3. Tripiés
4. Radios comunicadores
5. Pintura en aerosol
6. Cinta métrica de 3 m.
7. Estadal
8. Bote inflable
9. Equipo de Seguridad Personal
10. Vehículos

El levantamiento topográfico fue el primer paso para modelar la respuesta hidráulica del cauce del Canal Independencia, para lo cual se empleó un GPS topográfico marca Topcon modelo GR-3.

Métodos.

Trabajo de Gabinete.

Se realizó una investigación de tipo documental y de campo, procediéndose a efectuar una serie de entrevistas con el personal responsable de la administración y operación del Distrito de Riego 014, Río Colorado. A su vez se inició una campaña de recolección e información y datos históricos sobre todo lo relacionado con los volúmenes obtenidos de aguas superficiales y subterráneas en el distrito de riego, para lo cual fue necesario la obtención de planos topográficos, suelos, hidrológicos, operación del Distrito Riego, Drenes y Canales, Pozos, los cuales nos ayudaron

para la obtención de parámetros hidráulicos e hidrológicos que se presentan en la zona de estudio.

Se efectuó una serie de visitas de inspección a cada uno de los componentes del sistema, que permitió analizar las características físicas y operacionales de los mismos, aprovechándose para realizar un seguimiento de sus condiciones actuales de funcionamiento, así como también se comenzó con la medición de los parámetros antes mencionados, que son necesarios para la aplicación del modelo de conducción agua a través de la red mayor.

Para la generación del modelo se utilizaron planos digitales como el topográfico, el de suelo, el hidrológico y el hidráulico, en donde se establecieron los límites de operación del Canal Independencia que pertenece a la red mayor con el fin de darles un preprocesamiento y así poder generar un modelo para el flujo del agua con o sin la presencia de estructuras hidráulicas, siendo este el que nos permitió simular diferentes escenarios para la proyección de la problemática detectada en la conducción del agua y encontrar posibles soluciones.

Una vez finalizada la etapa de simulación se clasificaron las soluciones obtenidas permitiendo así seleccionar la mejor alternativa o el mejor escenario (Figura 2.6).



Figura 2.6. Metodología utilizada.

Fuente: Este estudio.

Para la estimación de las pérdidas por evaporación en el Canal Independencia se realizó una recopilación de información climatológica la cual se obtuvo de estaciones ubicadas en la zona, la cual se complementó con la información hidrométrica de canal independencia, una vez obtenida esta información se analizó estadísticamente la información recabada.

En el caso de la estimación de las pérdidas por infiltración en el Canal Independencia se realizó una recopilación de información documental y no fue posible elaborar las mediciones de campo correspondientes para el fenómeno de la infiltración, sin embargo se tomaron como base los resultados de las investigaciones sobre las pérdidas de agua por infiltración en estanques de prueba, construidos en tramos reales representativos en el Distrito de Riego 014, Rio Colorado.

Trabajo de Campo.

En los primeros meses del 2009 se había elaborado un reconocimiento previo utilizando un equipo GPS, para el Canal Independencia, el cual sirvió de base para el levantamiento topográfico, en total se realizaron cinco salidas de campo durante un periodo de doce meses, con el objeto de obtener la información necesaria que permitiera realizar la simulación hidráulica de este canal.

El trabajo se desarrolló tomando como punto base la compuerta hidráulica para el control del cauce ubicada en el Km 4+420, desde este punto se abarco 4 420 metros aguas arriba sobre el Canal y se tenía un radio de cobertura de aproximadamente 10 000 metros en ambas direcciones, ya que la cobertura de este equipo no es muy grande, fue necesario mover la base en base a las necesidades de este mismo levantamiento, tal como se puede ver en las Figuras 2.7 a la 2.10.



Figura 2.7. Base instalada en compuerta km 4+420.
Fuente: Este estudio.



Figura 2.8. Levantamiento desde Bocatomas Norte y Sur.
Fuente: Este estudio.



Figura 2.9. Recogiendo equipo de levantamiento en compuerta km 4+420.

Fuente: Este estudio.



Figura 2.10. Trasladando equipo de levantamiento a compuerta km 13+800.

Fuente: Este estudio.

En los dos primeros recorridos que fueron en los meses de Enero a Marzo solo se necesitó una brigada de 2 personas y un solo vehículo, los últimos tres recorridos realizados de Junio a Julio de ese año la brigada para el levantamiento fue de 6 personas y dos vehículos, ya que se requirió de personal para las distintas

maniobras que exige el levantamiento de un canal en operación, las Figuras 2.11, 2.12 y 2.13 presentan algunas de las actividades que se realizaron.



Figura 2.11. Cruce del canal para sujetar lancha.

Fuente: Este estudio.



Figura 2.12. Sujetando lancha para tomar puntos de levantamiento.

Fuente: Este estudio.



Figura 2.13. Preparar equipo.

Fuente: Este estudio.

Capítulo 3

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Contexto General.

El Distrito de Riego 014, Río Colorado pertenece al municipio de Mexicali, y se ubica en la cuenca del Colorado en su parte llamada “Cuenca Baja” que incluye California, Arizona, Nevada para la Unión Americana y Baja California en México. Este espacio geográfico se encuentra en una porción de la cuenca que se caracteriza por su cercanía a la costa en la porción Centro-Este de la planicie costera en una zona árida en la que la precipitación media se encuentra entre 0 y 6.38 mm al año, tal como se ve en la Figura 3.1 (USBR 2009).



Figura 3.1. Extensión Territorial del Municipio de Mexicali.

Fuente: *Elaboración propia.*

Con base en acuerdos del Tratado Internacional de Límites y Aguas celebrado con México en 1944, la Suprema Corte de los Estados Unidos decretó que 1.5 millones de acres-pie (1,850 millones de metros cúbicos anuales) corresponderían a México.

Entorno Natural.

Geología.

El Valle de Mexicali queda situado dentro de una zona de alta actividad sísmica.

Las fallas que impactan al Valle de Mexicali son:

La Falla Imperial localizada a 12 km al Este del Centro Cívico con una longitud de 75 km, corre de Noreste a Sureste pasando por los Ejidos Tamaulipas, Saltillo y Guerrero, esta falla ha presentado dos sismos importantes entre 6.0 y 6.9 grados en la escala de Richter en los últimos 50 años lo que representa riesgos para las áreas urbanas (González 1990).

La Falla de Cerro Prieto, paralela a otras fallas como son la Laguna Salada, San Andrés y Michoacán, cruza el Campo Geotérmico y se cree que es una posible ramificación de la Falla de San Jacinto (Puente, 1978). Dentro de la zona de influencia de esta falla se encuentra la ciudad de Mexicali, a una distancia aproximada de 30 km. La actividad de esta falla en el Ejido Nuevo León y Ejido Hidalgo ha provocado sismos con intensidad de 5.0 y 5.9 grados en la escala de Richter.

La Falla Cucapah que se localiza en la sierra del mismo nombre, está ubicada al Suroeste del centro de población, los sismos que han tenido su epicentro dentro de su radio de influencia han sido de 5.0 a 5.9 grados en la escala de Richter.

La Falla de la Laguna Salada, se localiza al Norte de la Laguna Salada, y aunque no se encuentra dentro de la zona de estudio, su actividad sísmica impacta a la ciudad. Esta falla ha tenido epicentros de sismos de 5.0 a 6.9 grados en la escala de Richter.

La Falla Michoacán se localiza paralela a la vía del ferrocarril y la carretera del Ejido Puebla al Michoacán de Ocampo, desde Cerro Prieto al Sur, prolongándose al área urbana en dirección Noroeste, al Sur de la Colonia Robledo.

Hidrología Superficial.

El Distrito de Riego 014, se ubica en el Municipio de Mexicali y para esta zona quedan comprendidas las regiones hidrológicas número 4 y 7 como se aprecia en la Figura 3.2.

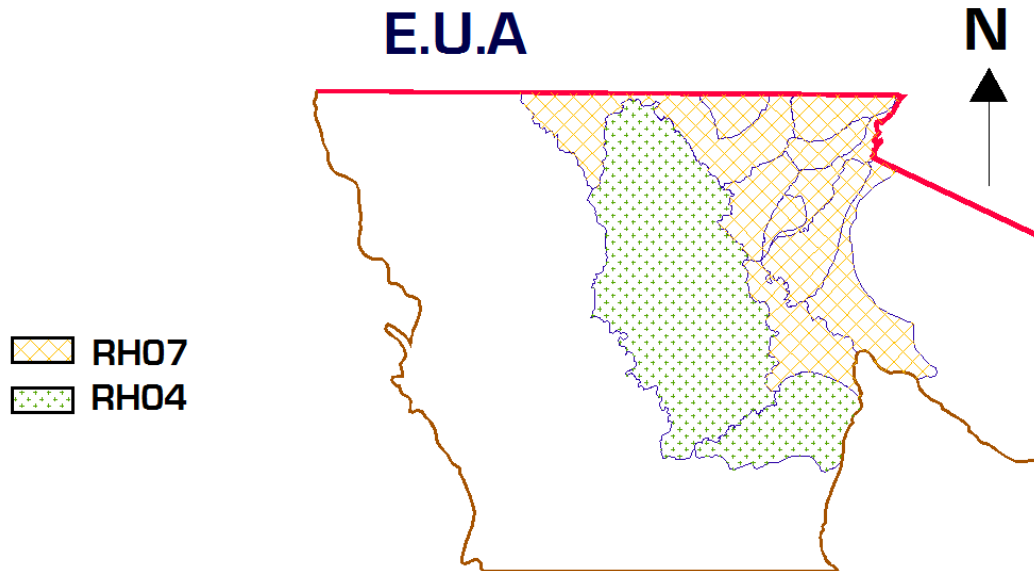


Figura 3.2. Regiones Hidrológicas para el municipio de Mexicali, B.C.

Fuente: Adaptación de IRIS-INEGI.

Región Hidrológica Baja California Noreste (No. 4).

“Baja California Noroeste (Laguna Salada)”, esta región queda limitada al Norte por la bifurcación que tiene la Sierra de Juárez a partir del Cerro Tres Pinos (1516 msnm). El parte aguas occidental está constituido por las crestas de una serranía, de menor importancia que la sierra oriental; sierra Los Cucapas y sierra El Mayor. En la parte Centro-Este está limitada por el Golfo de California y en la Centro-Oeste por la sierra San Pedro Mártir hasta unirse con las sierras de San Felipe y Santa Isabel Sur por las regiones hidrológicas 2 y 5 tal como se ilustra en la Figura 3.3.

La región hidrológica está integrada por dos cuencas:

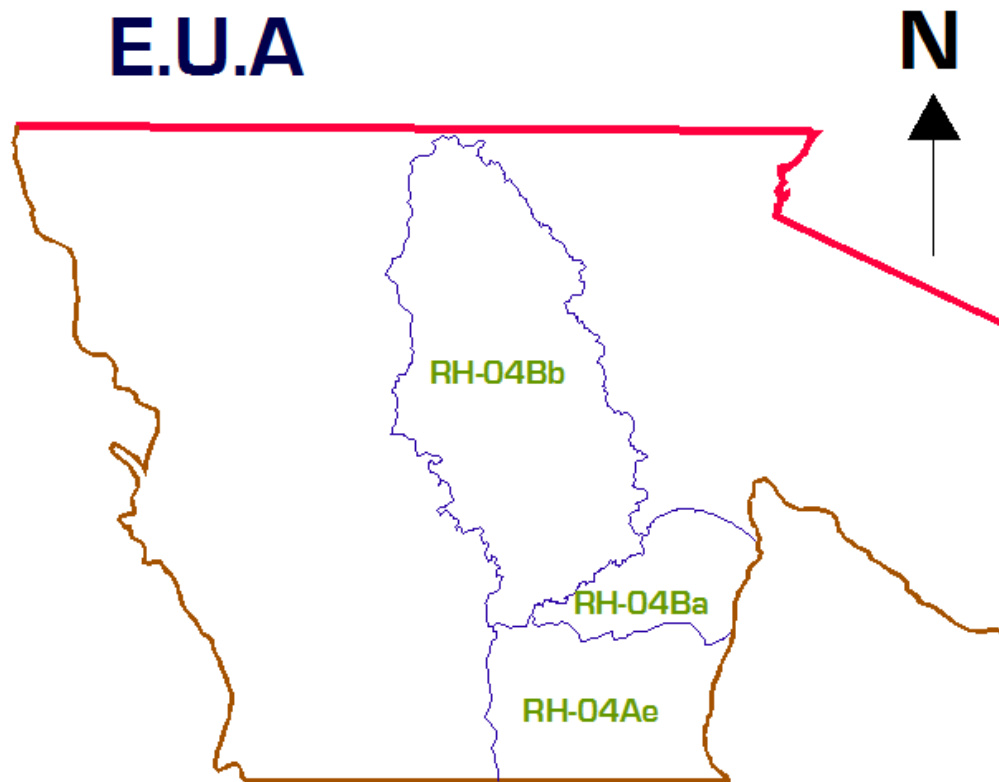


Figura 3.3. Región Hidrológica número 4.

Fuente: Adaptación de IRIS-INEGI.

Cuenca 4A, denominada Agua Dulce-Santa Clara, con una superficie de 7,908.10 km², está integrada por las subcuencas al Arroyo Agua Dulce (4Aa), Arroyo San Fermín (4Ab), Arroyo Huatamonte (4Ac), San Felipe (4Ad) y Santa Clara (4Ae). Esta cuenca tiene como corriente principal el Arroyo Agua Dulce, que no posee un cauce bien definido porque las lluvias son ocasionales y no corren siempre por el mismo sitio. Sin embargo, su desembocadura es invariablemente frente a la isla Miramar.

Cuenca 4B, Laguna Salada- Arroyo del Diablo, tiene un área en el Estado de 7,373.18 km², limitada por la vertiente oriental de la Sierra de Juárez y por la occidental de la Cucapah, tiene como subcuencas a la Laguna Salada (4Bb) y la del Arroyo del Diablo (4Ba). La cuenca está limitada por la vertiente oriental de la sierra de Juárez y por la occidental de la sierra Los Cucapas, que alcanzan altitudes de

1800 y 1100 msnm; están orientadas de Norte a Sur y de Noroeste a Sureste respectivamente, de manera que en su interior se aloja una amplia región llana y sin altitudes superiores al nivel del mar. Esta condición genera en ella áreas de drenaje deficiente donde se forman lagunas y médanos, pues ningún escurrimiento tiene posibilidades de desembocar en el Golfo de California, debido a la poca agua en su cauce y a la lejanía de la costa (65 km); por tanto se le puede considerar como una cuenca cerrada. En esta cuenca se encuentra situada la Laguna Salada que es una subcuenca intermedia al igual que la del Arroyo del Diablo (Carta Hidrológica Aguas Superficiales Escala 1:250,000 INEGI).

Región Hidrológica número 7 “Río Colorado”.

Se localiza en la parte Noreste de la entidad, esta región comprende parte del Estado de Sonora (Figura 3.4) y únicamente el margen derecho de Baja California y tramo final del Colorado, está constituida por dos cuencas, una localizada totalmente en Baja California y la otra casi en su totalidad en el Estado de Sonora.

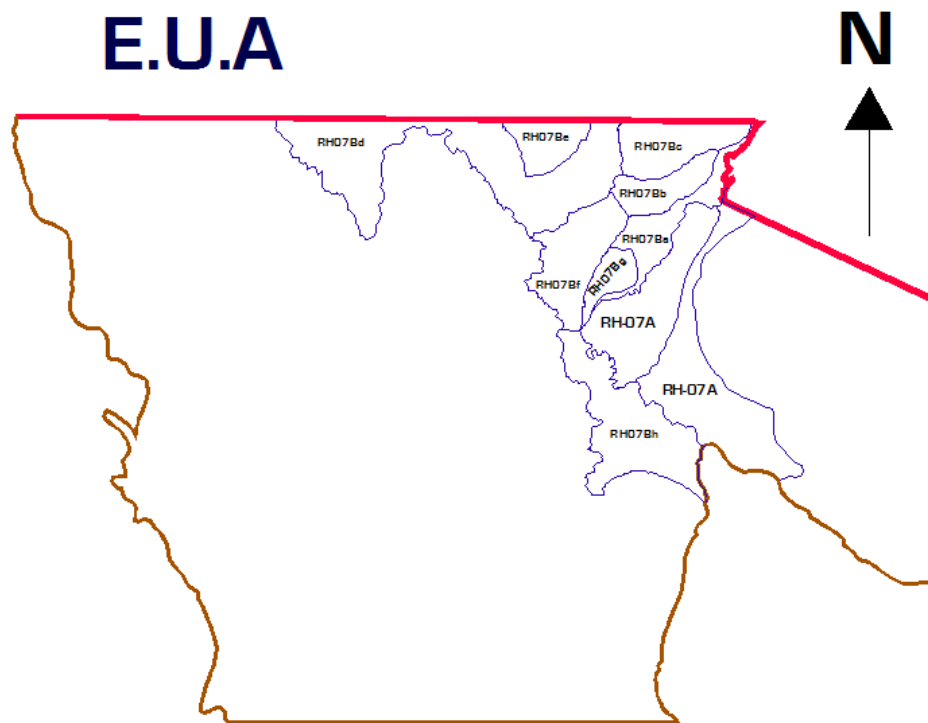


Figura 3.4. Región Hidrológica número 7.

Fuente: Adaptación de IRIS-INEGI.

Cuenca 7A: “Bacanora-Mejorada”, abarca únicamente la porción Sur de la desembocadura del Golfo de California hasta el cauce del Río Colorado.

Cuenca 7B: “Río Colorado”, cubre una superficie de 5,923.16 km² y su corriente principal es el Río Colorado, tiene como subcuencas el Río Colorado (7Ba), Río Las Abejas (7Bb), Canal El Álamo (7Bc), Canal Cerro Prieto (7Bd), Río Nuevo(7Be), Río Hardy (7bf), Río Pescadores (7Bg) y Bajo Río Colorado (7Bh). Esta cuenca tiene como corriente principal al Río Colorado. El recorrido total del Río Colorado en nuestro país es aproximadamente 90 km y aporta 1,850 millones de metros cúbicos anuales de agua, que son aprovechados para el riego en el Distrito del Río Colorado (Carta Hidrológica Aguas Superficiales Escala 1:250,000 INEGI).

Principales Ríos y Arroyos.

La Región Hidrológica 4, presenta escurrimientos superficiales de poca importancia, arroyos efímeros que desembocan en el Golfo de California, la corriente principal es el Arroyo Agua Dulce y Arroyo del Diablo.

Región Hidrológica 7, en esta región no se generan escurrimientos significativos, la corriente principal es la del Río Colorado, que se origina en territorio estadounidense y recorre aproximadamente 90 km en nuestro país, esta corriente es de carácter intermitente, destaca también el Río Hardy con una longitud de 26 km y desemboca en el cauce Sur del Río Colorado y el Río Nuevo formado por las aguas de retorno agrícola, residual e industrial de la Cuidad de Mexicali.

Unidades Geohidrológicas.

Las rocas y los suelos del estado de Baja California se han agrupado de acuerdo a sus características físicas (porosidad, permeabilidad y posibilidades de que funcionen como acuíferos o no) en seis tipos, de los cuales cuatro están registrados en la entidad.

El material consolidado con posibilidad baja está formado principalmente por rocas plutónicas tales como graniodorita y tonalita, así como también por esporádicos afloramientos de gneis y basalto entre otras. Las rocas que ocupan estas unidades no son susceptibles de formar acuíferos debido a su estructura masiva.

El material no consolidado de posibilidad alta se encuentra formado por suelos aluviales y por conglomerados semi-consolidados que constituyen acuíferos del tipo libre (formaciones geológicas que permiten que el agua subterránea esté sometida a

la presión atmosférica sin ningún tipo de confinamiento). La presencia de agua está comprobada por numerosos aprovechamientos hidráulicos (pozos) de gasto regular.

El material no consolidado de posibilidad media está formado por afloramientos de areniscas, conglomerado, conglomerado poco consolidado, margas y aluviones poco cementados. Este material es susceptible de contener agua debido a su gran permeabilidad y a la existencia de infraestructura hidráulica (pozos). Se localiza a lo largo de la costa del Océano Pacífico y en la porción sur del estado.

El material no consolidado con posibilidad baja está representado por conglomerado del Terciario inferior, polimictico, con fragmentos subredondeados, mal seleccionados, empacados en una matriz arenosa con presencia de carbonato de calcio, poco consolidado y con fracturamiento escaso; debido al poco espesor que presenta de 5 a 10 m y a su posición topográfica no son susceptibles de formar acuífero.

Distribución de las unidades geo hidrológicas para el municipio de Mexicali.

El Municipio de Mexicali, presenta una distribución muy marcada en las unidades hidrológicas a lo largo de la entidad, estas son cuatro y se distribuyen de la siguiente manera:

Unidad de material consolidado con posibilidades bajas: se localiza principalmente en las zonas montañosas; Sierra de Juárez, Sierra Cucapah, Sierra El Mayor, Cerro Prieto, El Rosario, Las Tinajas Altas, Sierra de San Pedro Mártir, Sierra de San Felipe y Sierra de Santa Rosa.

Unidad de material no consolidado con posibilidades altas: se localiza en las zonas planas de la región; Valle de Mexicali, área de la Laguna Salada, Llano El

Chinero, Llano el Moreno, Valle de Santa Clara, Valle de San Felipe, Valle Chico y zona costera de San Felipe.

Unidad de material no consolidado con posibilidades medias: se localiza muy escasamente en los flancos de las zonas montañosas; Sierra Juárez y Cucapah, y en algunas zonas planas; al Noroeste de las Sierras de San Felipe y Suroeste de Las Tinajas.

Unidad de material no consolidado con posibilidades bajas: se encuentra principalmente en la parte Sur del Río Colorado, Delta del Río Colorado, escasamente en algunas zonas de las Sierra Cucapah y El Mayor, Juárez, al Sur de la Sierra Las Tinajas y al Suroeste de la Sierra de San Pedro Mártir, Llano el Chinero, al Noreste de Valle Chico y en los flancos de la Sierra de Santa Rosa.

Para el municipio las direcciones del flujo de aguas subterráneas, se concentra en dos puntos principalmente en el Valle de Mexicali, donde el flujo entra al Valle por la zona Noroeste, proveniente de los Valles Imperial y Yuma (EEUU.), parte del agua subterránea fluye hacia el poniente hasta las proximidades de la Ciudad de Mexicali, donde cambia la dirección para dirigirse, parte hacia el Norte y otra hacia el Golfo de California, la recarga principal proviene del Río Colorado.

El segundo punto donde hay flujo de aguas subterráneas se localiza en el Valle de Santa Clara donde el flujo se concentra en la Cuenca La Salada.

Se reporta la existencia de un acuífero de tipo libre ubicado en el Valle de Mexicali, otro en el Valle de San Felipe el Rosario y Chico, el primero se utiliza con fines domésticos y pecuarios los restantes para uso de riego y pecuario.

Existen tres zonas de concentración de pozos, estos se ubican en la zona de riego del Valle de Mexicali, en la zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y zona de pozos exploratorios de la Comisión Federal de Electricidad. (CFE.)

Las condiciones geohidrológicas en las que se encuentra el Municipio de Mexicali comprenden 6 Cuencas, las cuales presentan las siguientes características. Zona sobre-explotada: Cuenca del Valle de Mexicali, zona sub-explotada: Cuenca Laguna Salada, Jamaú y El Chinero, zona en equilibrio: cuenca San Felipe-Punta Estrella y Valle Chico-San Pedro Mártir.

Suelos.

Los suelos del valle de Mexicali, Baja California, son el resultado de un proceso de formación típica de un delta, (Río Colorado) sobre una planicie de inundación.

Su distribución textural, características físicas y químicas dependen totalmente de la distancia del recorrido de sus aguas, hasta la desembocadura del río, la composición química de los suelos que atravesaron, la pendiente, la velocidad e intensidad de las avenidas que erosionaron y arrastraron gran cantidad de sedimentos y que estos fueron depositados de manera cíclica, en la época de deshielos y lluvias intensas, dando origen a los suelos de este Valle de Mexicali. Este proceso formó lo que se conoce como el Gran Cañón del Colorado, cuya profundidad máxima es de 1600 metros. De esta forma, la deposición y ubicación de los suelos de textura arenosa, de acuerdo al tamaño de la partícula, y a la pérdida de la capacidad de transporte de los escurrimientos, se dará en las partes altas. De acuerdo a la aplicación del mismo criterio del tamaño de la partícula, y obedeciendo a la velocidad de caída en una mezcla de agua, que es como llegaron estos suelos a la región, los suelos de textura franca fueron los que se depositaron después de los suelos arenosos.

Los suelos que así se formaron corresponden a las clasificaciones de migajones o migajonosos, que mediante combinaciones con arena y con arcilla, conforman diferentes grupos de suelos del tipo franco, o bien como se conoce como suelos medios, de acuerdo a su dificultad de labranza. Derivado de este proceso de formación

estratigráfica, una característica de los suelos aluviales, como es el caso Valle de Mexicali, se encuentra una sobre posición de capas de suelo de diferente grosor, que dependiendo del efecto de inundación, será como se forme el estrato de suelo.

En base a estas características, podemos encontrar dos zonas de suelos cuya textura no ha sido alterada, y es el caso de los suelos arcillosos y arenosos, que en una profundidad media de cinco metros, se encuentra suelo con prácticamente la totalidad de arcilla, o la totalidad de arena. La parte central del delta es árido, que consiste usualmente de un proceso de ínter estratificación de arcilla arenosa, lentes pequeños de cristales de piedra, arcilla y arena, sobrepuestas con arcilla arenosa y arcilla, no alcanza espesores mayores que 10 m lo mismo que en los costados del río, los suelos están constituidos por arena con lentes de grava y en las partes más alejadas del proceso de inundación, predominan varios tipos de arcillas plásticas, por ejemplo, el área noroeste del Valle de Mexicali.

La distribución de suelos por su textura, se muestran en la Figura 3.5, donde puede indicar cuales son las zonas donde predomina los suelos de textura ligera y media, que corresponde a los suelos con mayor potencial productivo; así mismo, se muestran las áreas donde predominan los suelos pesados o arcillosos. (ICA-UABC 2008)

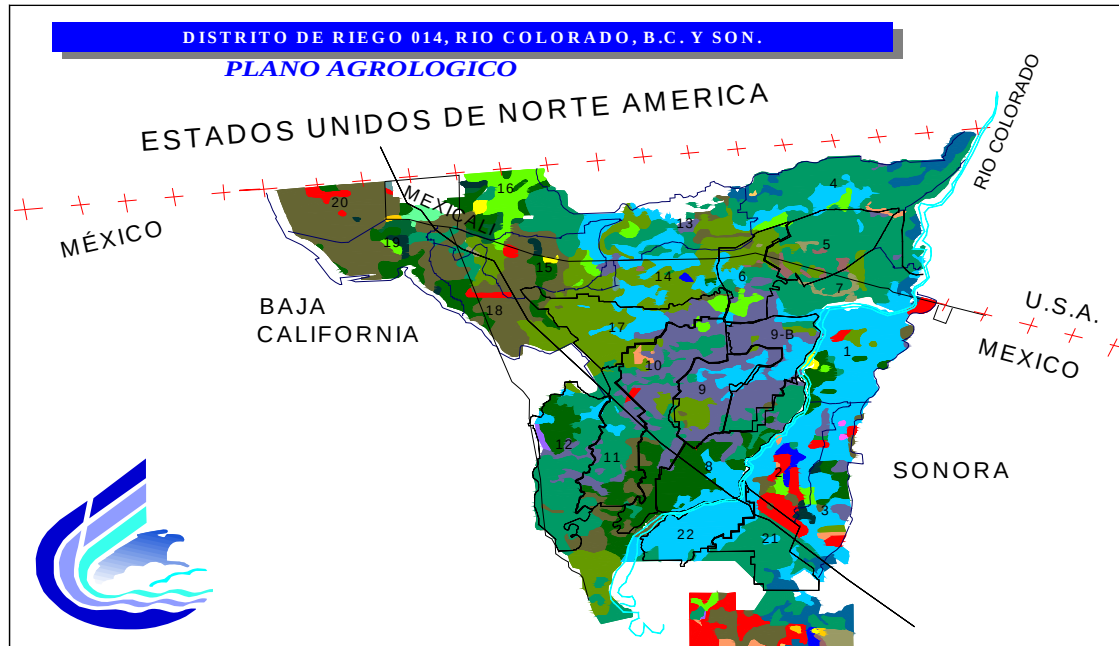


Figura 3.5. Tipo de suelos en D.R. 014, Rio Colorado.

Fuente: CONAGUA, 2006.

Clima.

Características climatológicas de la cuenca.

Las características climatológicas de la cuenca corresponden a las mismas que se presentan para la ciudad de Mexicali y que se establecen con los datos registrados en las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la ciudad y en el Valle de Mexicali como se muestran en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Ubicación de las estaciones climatológicas No. 3 Mesa de Andrade operada por SIMARBC y Bataques operada por CONAGUA en el Valle de Mexicali.

Fuente: Elaboración propia.

La zona en estudio presenta un clima muy seco semicalido, el clima está caracterizado como frío y húmedo en invierno y seco y caliente en verano, de acuerdo a la clasificación de Koppen, modificada por García (1981), el clima es del tipo BW hs (x'), el ecosistema asociado con este clima y localización es comúnmente conocido como semiárido (desértico), el cual se establece en gran parte de la zona Suroeste de la Cuenca del Colorado en sus límites con la cuenca de la Laguna Salada, región hidrológica No. 4 de la Comisión Nacional del Agua.

Para la determinación de las características climatológicas de la zona se obtuvieron los registros de las estaciones climatológicas de la Secretaría de Fomento Agropecuario siguientes y Comisión Nacional del Agua siguientes:

Estación Agroclimatológica No. 3 Mesa de Andrade

Ubicación: Mesa Testamentaria de Andrade, Valle de Mexicali.

Altura: 39.969 metros sobre el nivel del mar.

Coordenadas geográficas: 32°40'28" N, 115°02'37" W.

La estación climatológica tiene un periodo de registros del 1 de Octubre del 2008 al 30 de Septiembre del 2009 esta se ve en la Figura 3.7 y se encuentra ubicada en la Mesa de Andrade..

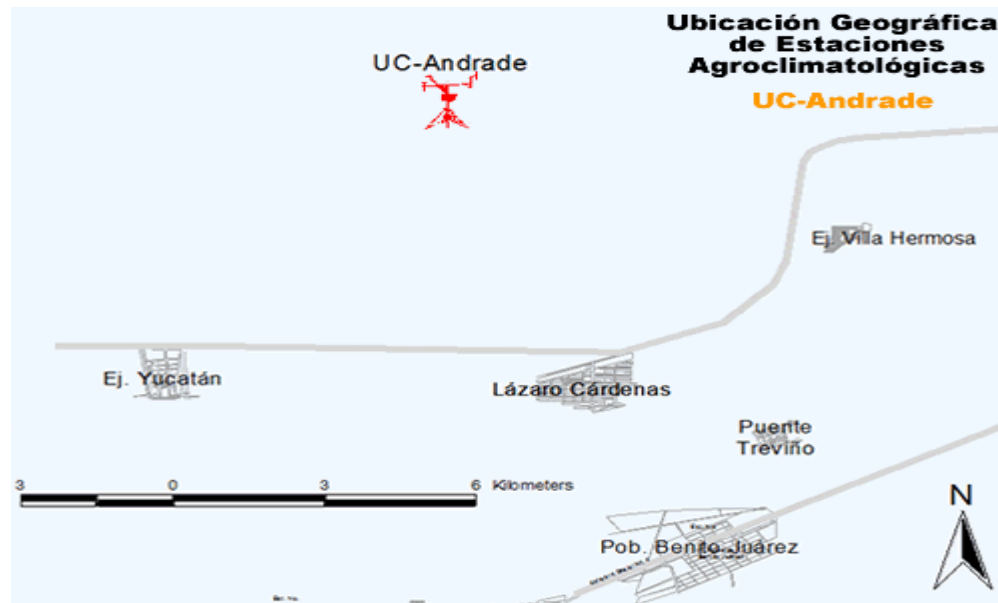


Figura 3.7. Ubicación de la estación Agro climatológica, No. 3 Mesa de Andrade.

Fuente: Sistema de Información de Manejo de Agua de Riego en Baja California.

A continuación se muestra la información climatológica de la estación Agroclimatológica No. 3 para el área de estudio se muestra de las Tablas 3.1 a la 3.3.

Tabla 3.1. Radiación medida, Estación Agro climatológica No. 3 Mesa de Andrade.

Mes	Radiación Est 1 (W/m ²)		
	Max.	Min.	Med.
Octubre/2008	208.0	137.0	185.7
Noviembre/2008	161.0	47.0	132.5
Diciembre/2008	132.0	16.0	102.2
Enero/2009	168.0	91.0	135.5
Febrero/2009	243.0	65.0	162.8
Marzo/2009	290.0	70.0	235.5
Abril/2009	324.0	220.0	290.6
Mayo/2009	332.0	140.0	303.5
Junio/09	341.0	173.0	300.6
Julio/2009	319.0	190.0	290.7
Agosto/2009	314.0	128.0	276.5
Septiembre/2009	307.0	236.0	286.9

Fuente: Elaboración este estudio basándose en datos proporcionados por estación climatológica.

Tabla 3.2. Temperaturas medidas, Estación Agro climatológica No. 3 Mesa de Andrade.

Mes	Temperatura Ambiente (°C)		
	Max.	Min.	Med.
Octubre/2008	34.0	12.8	23.1
Noviembre/2008	27.6	8.7	17.8
Diciembre/2008	19.6	4.7	11.6
Enero/2009	23.0	4.9	13.5
Febrero/2009	23.0	5.3	13.9
Marzo/2009	26.5	6.6	16.7
Abril/2009	29.1	9.2	19.5
Mayo/2009	37.0	16.9	27.4
Junio/09	36.3	18.8	28.0
Julio/2009	42.2	25.6	34.2
Agosto/2009	41.9	23.2	32.8
Septiembre/2009	40.1	21.9	30.8

Fuente: Elaboración este estudio basándose en datos proporcionados por estación climatológica.

Tabla 3.3. Velocidades medidas, Estación climatológica No. 5 UC-Mexicali.

Mes	Vel. Prom. Viento (m/s)
Octubre/2008	1.70
Noviembre/2008	1.80
Diciembre/2008	1.80
Enero/2009	2.00
Febrero/2009	1.80
Marzo/2009	1.80
Abril/2009	2.00
Mayo/2009	2.00
Junio/09	2.30
Julio/2009	2.30
Agosto/2009	2.10
Septiembre/2009	0.50

Fuente: Elaboración este estudio basándose en datos proporcionados por estación climatológica.

Precipitación.

La zona en estudio se caracteriza por la poca precipitación que se tiene con respecto al resto del País, de acuerdo con los datos procesados para la estación meteorológica de Bataques en el Valle de Mexicali (Figura 3.8) , operada por la Comisión Nacional del Agua, para el periodo comprendido de 1971 a 2000 se tienen los siguientes valores promedio:

Estación meteorológica de Bataques, Valle de Mexicali.

Ubicación: Bataques, Valle de Mexicali.

Altura: 23.00 metros sobre el nivel del mar.

Coordenadas geográficas: 32°33'04" N, 115°04'08" W.

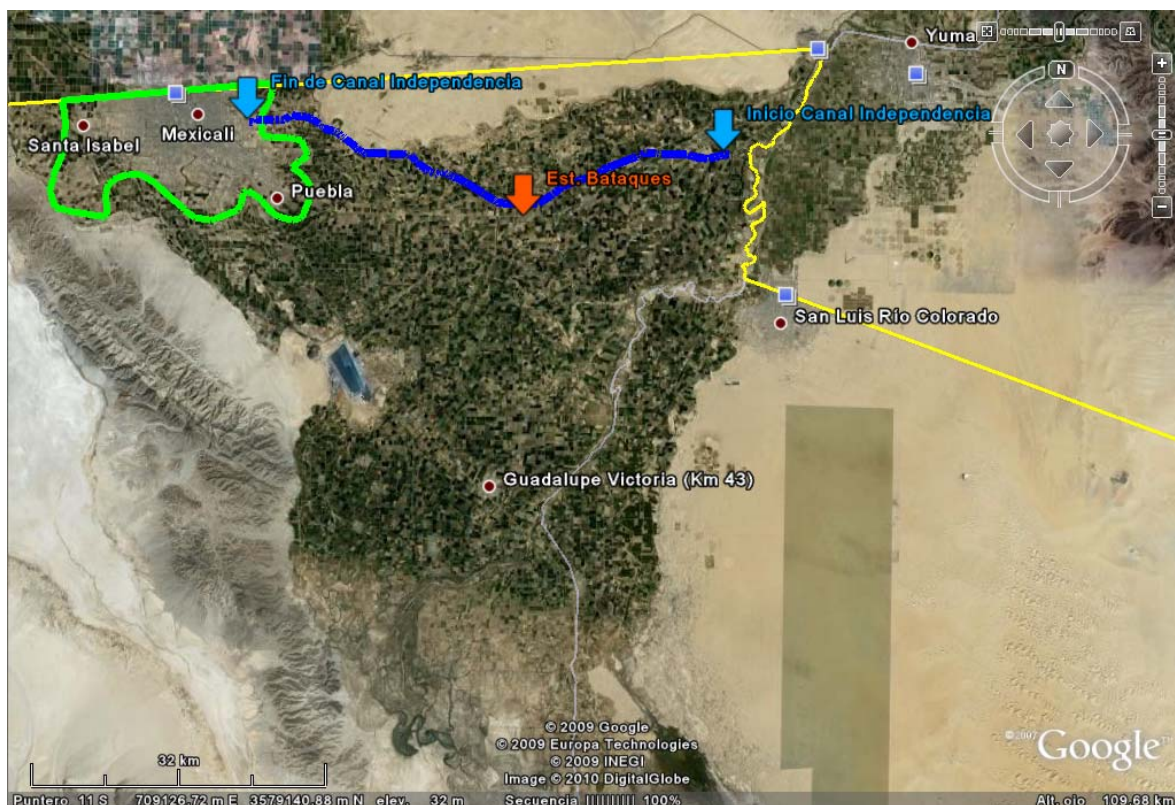


Figura 3.8. Ubicación estación meteorológica de Bataques, Valle de Mexicali.

Fuente: Elaboración este estudio basándose en datos proporcionados por estación climatológica.

El promedio de lluvia para el periodo antes mencionado es del orden de los 5.66 mm. En tanto que la precipitación máxima registrada tiene un valor de 92.4 mm en 24 horas (1972).

A continuación se presentan los datos de la lluvia total media en mm (Tabla 3.4) y el número medio de días con lluvias basados en la información climatológica para un periodo de 30 años comprendido del año de 1971 al año de 2000, fuente CNA.

Tabla 3.4. Precipitación medida por estación de Bataques (CONAGUA 2008).

	Lluvia Máxima Mensual (mm)	Año de la Máxima	Lluvia total media (mm)	Número de días con Lluvia (mm)
Octubre	92.4	1972	7	1.1
Noviembre	15	1993	2.4	0.8
Diciembre	38.5	1984	10.3	1.7
Enero	50.8	1993	10.1	1.7
Febrero	45	1976	8.7	1.6
Marzo	71	1992	8.3	1.8
Abril	24.4	1984	3.1	0.6
Mayo	7.5	1992	0.7	0.3
Junio	2	1972	0.1	0.1
Julio	20	1982	1.9	0.5
Agosto	76	1983	8.4	0.9
Septiembre	65.5	1976	6.9	0.7

Fuente: Elaboración propia basándose en datos proporcionados por estación climatológica.

Ubicación del área de estudio.

El Distrito de Riego 014, Río Colorado cuenta con 208,223 hectáreas de derechos de riego correspondientes a 15,894 usuarios agrícolas, que están registrados en el padrón, se dispone de un volumen de agua de 2,747.59 millones de metros cúbicos anuales cuyas fuentes son el Río Colorado y el subsuelo. El Distrito de Riego está dividido en tres unidades de riego y estas a su vez en 22 módulos de riego mismos que son administrados y operados por los propios usuarios.

La ubicación de los límites de red mayor nos permitirá de manera precisa no extendernos a otras áreas las cuales no son el objeto de estudio y ver los efectos que se producen en otras zonas que están relacionadas (Figura 3.9).

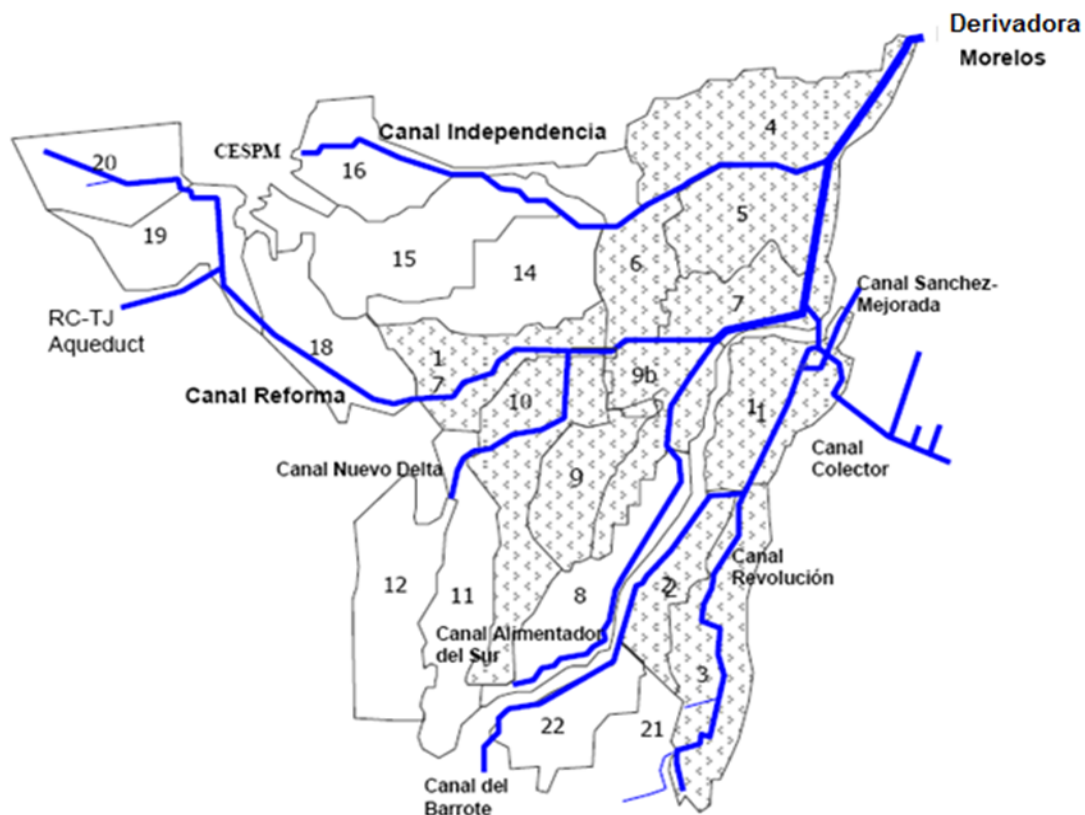


Figura 3.9. Límites de Red Mayor.

Fuente: CONAGUA, 2006.

El área de estudio seleccionada es la primera unidad de la red mayor la cual corresponde al Canal Independencia y entrega agua a los módulos 4, 5, 6, 7, 14, 15 y 16. Se encuentra ubicado en la parte Norte del Distrito de Riego 014, Río Colorado. Ocupa una superficie de 76,422 hectáreas, de las cuales 35,647 hectáreas reciben agua por gravedad, 30,083 hectáreas por Pozo Federal y finalmente 10,690 hectáreas por Pozo Particular (Figura 3.9).

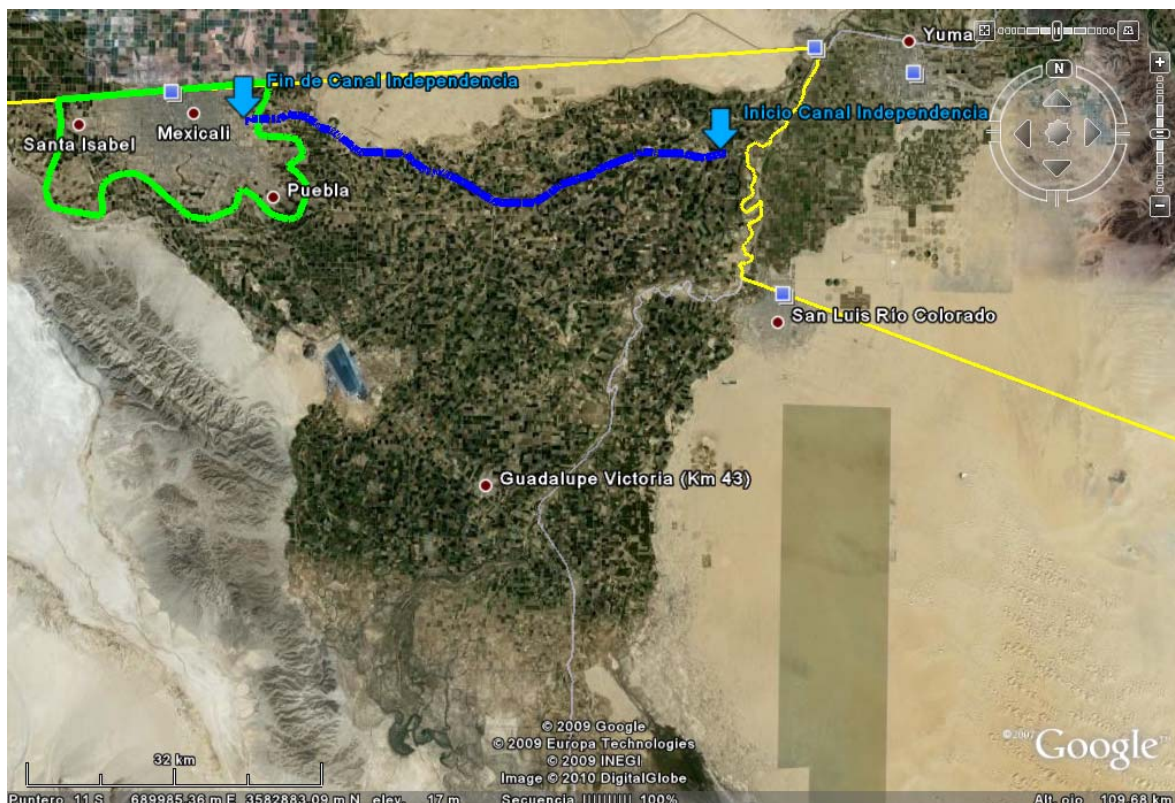


Figura 3.10. Ubicación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En el área geográfica de los módulos de riego se ubican los Ejidos Puebla, Guanajuato, Cuernavaca, Sinaloa, Tamaulipas, Jalisco, Tula, Irapuato, Yucatán, Querétaro, Monterrey, Tehuantepec, Distrito Federal, Lázaro Cárdenas, Colima, Hermosillo, Guadalajara, Mérida, Villahermosa, Poblado Benito Juárez, Ciudad Morelos y por último la Colonia República Mexicana.

Accesos.

El Canal Independencia nace con la Derivadora Galeana esta se ubica en el Ejido Pachuca y depende del Canal Alimentador Central (Reforma).

Para llegar al inicio del Canal Independencia por vía terrestre partiendo de la ciudad de Mexicali tomamos la carretera federal numero 2 la cual lleva hacia San Luis Río Colorado, Sonora dirigiéndonos en dirección Oeste-Este, pasando el ejido

Hermosillo tomamos la desviación hacia el Norte con rumbo al poblado Miguel Alemán después de pasar este poblado se llegará a el ejido Pachuca Figura 3.11.

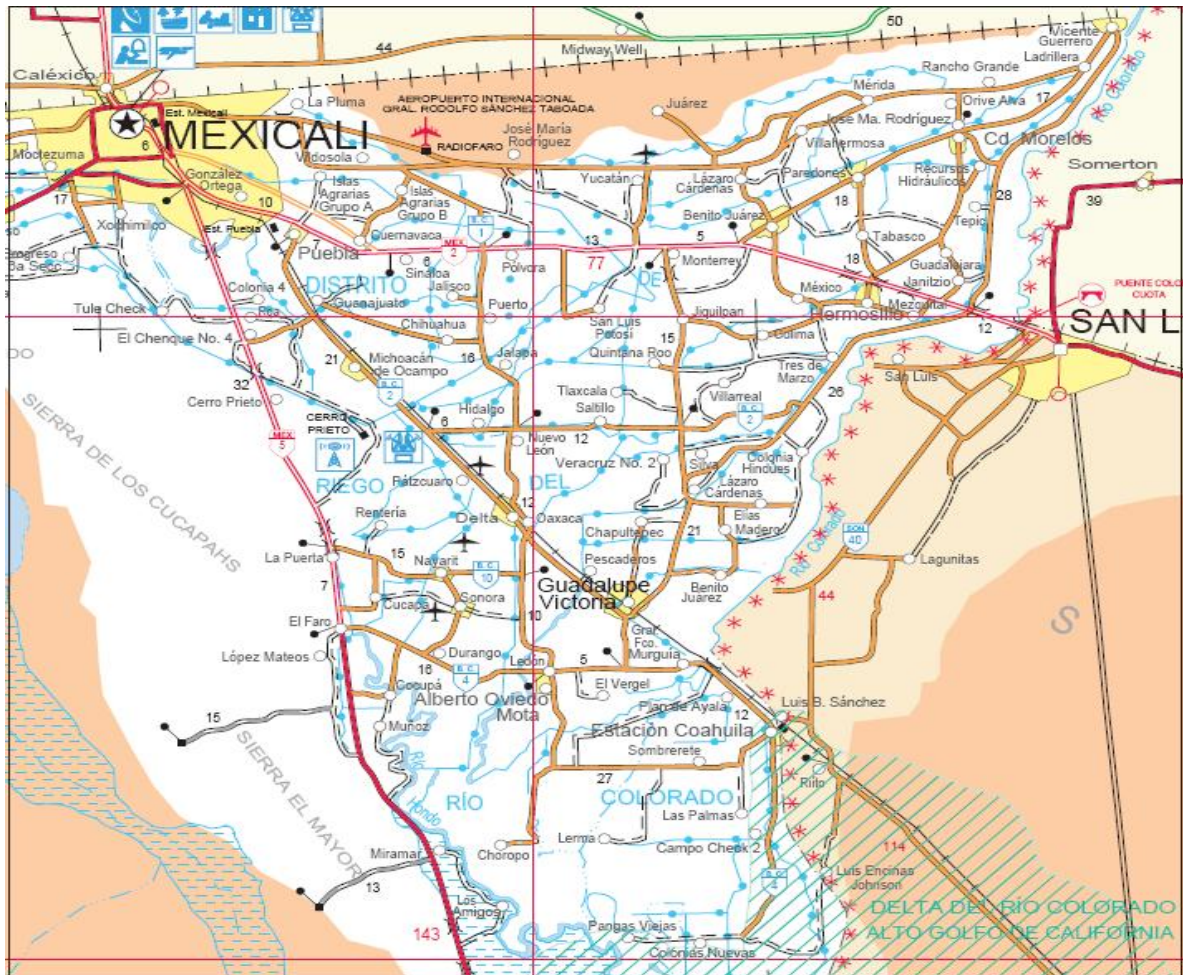


Figura 3.11. Accesos en el Valle de Mexicali.

Fuente: Secretaria de Comunicaciones y Transportes, 2006.

Características hidráulicas del D.R. 014 Río Colorado.

La obra del Distrito de Riego la constituyen 1,850 km de canales revestidos, así como 1,515 km de drenes (Tabla 3.5), a través de los cuales se distribuyen los 1,850 millones de metros cúbicos que el Estado recibe anualmente de la desembocadura del Río Colorado, según tratado internacional de 1944 asimismo, se complementan los volúmenes de agua requeridos para irrigar las 207 mil hectáreas

que actualmente comprenden la superficie del Distrito de Riego 014, con la explotación de 713 pozos profundos que aportan un caudal superior a los 900 millones de metros cúbicos anuales.

Tabla 3.5. Inventario de Obras.

INVENTARIO DE OBRAS			
PRESAS: Derivadora, Volumen Anual = 1,850,234Mm ³			
Obra			Totales
Canales (km)			
Principales	Revestidos: 350	Sin revestir: 120	470
Secundarios	Revestidos: 1,850	Sin revestir: 582	2432
Drenes (km)	Principales: 422	Secundarios: 1,240	1,662
Caminos (km)	Revestidos: 2,422	Sin revestir: 1,695	4,117
Estructuras	Canales: 7,731	Drenes: 1,288	9,019
Pozos			
Federales: 489	Particulares: 236	Sistema de Bombeo: 26	Equipos: 731

Fuente: Secretaria de Fomento Agropecuario, 2009.

Tipo de Canales.

Dentro de la red de canales de conducción y distribución del distrito tenemos 3 tipos:

- 1) **Canales Primarios:** Este tipo de canales son los que se utilizan a nivel de red mayor y son los que abastecen de agua a los canales secundarios. Los canales de red mayor son los siguientes Tabla 3.6, Reforma parte Principal, Alimentador del Norte, Independencia, Reforma, Nuevo Delta, Alimentador del Sur, Barrote, Revolución.

- 2) **Canales Secundarios:** Este tipo de canales son las Sub-Ramas de los canales primarios y estos se utilizan para transportar el agua a las parcelas de riego.
- 3) **Canales Terciarios:** Este tipo de canales son los que se utilizan a nivel interparcelario.

Tabla 3.6. Capacidad de los Canales Principales

Capacidad de los Canales Principales en m ³ /seg.			
Reforma	Independencia	Revolución	Alimentador del Sur
160	41	38	28

Fuente: Secretaria de Fomento Agropecuario, 2009

Tipo de Drenes.

Dentro de la red de Drenes tenemos 2 tipos:

- 1) **Drenes Primarios:** Este tipo de drenes son los que se utilizan para la extracción del agua de las parcelas con ayuda de la fuerza de gravedad, son esenciales para el buen funcionamiento del riego, en estos se recibe el agua de Drenes Secundarios y abarcan varios módulos de riegos.

Los Drenes principales son los siguientes, Mesa, Mexicali, Internacional, Xochimilco, Colector del Norte, Ferrocarril, Guerrero, Colector del Sur, Principal del Sur, Carranza, Camachito, Welton Mohawk.

- 2) **Drenes Secundarios:** Este tipo de drenes son utilizados en los ejidos y son drenajes a pequeña escala utilizados para extraer el agua de la superficie de las parcelas.

Descripción del Canal Independencia.

Usuarios del Canal Independencia.

En los usuarios que utilizan el agua se tienen los sectores, Domestico, Agrícola, Público e Industrial, siendo el agrícola el mayor consumidor de este recurso. La Figura 3.12 muestra los usos público urbano para la Ciudad de Mexicali.

En la Figura 3.12 se presentan los consumos de agua en la Ciudad de Mexicali para cada sector.

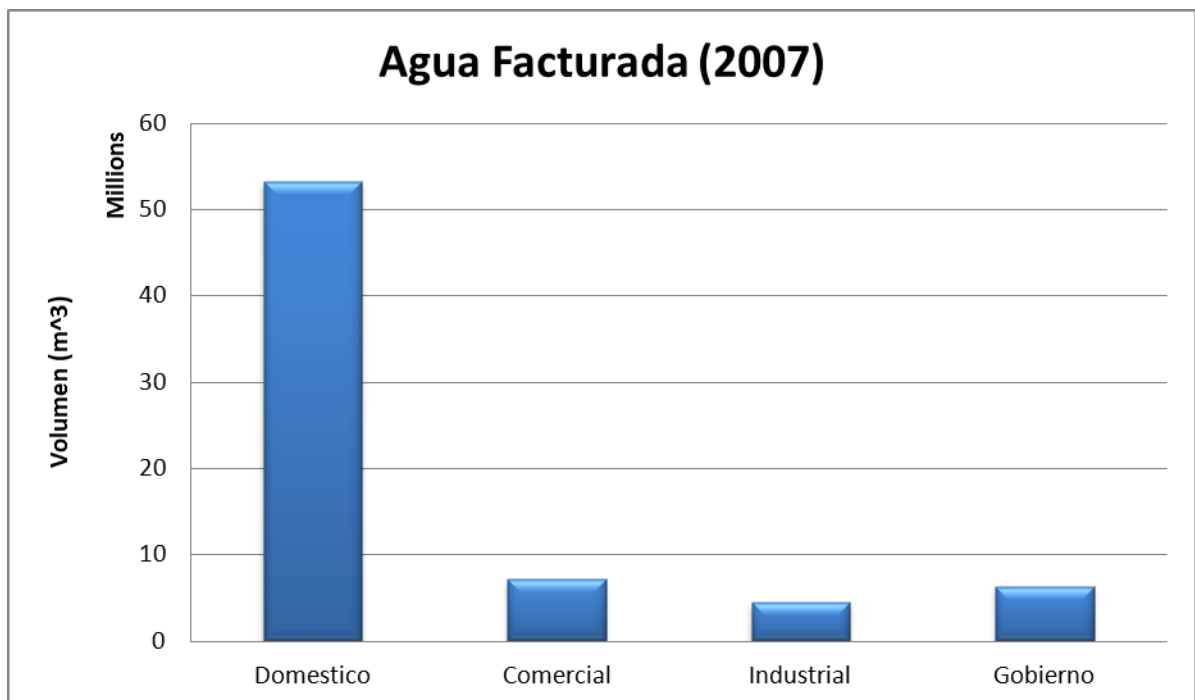


Figura 3.12. Consumos de agua uso Urbano Mexicali.

Fuente: Indicadores de gestión CESP, 2007.

Para el agua en los módulos se depende directamente de los derechos de las superficies con riego y en base a esto se da la asignación de este recurso (Figuras 3.13 y 3.14).

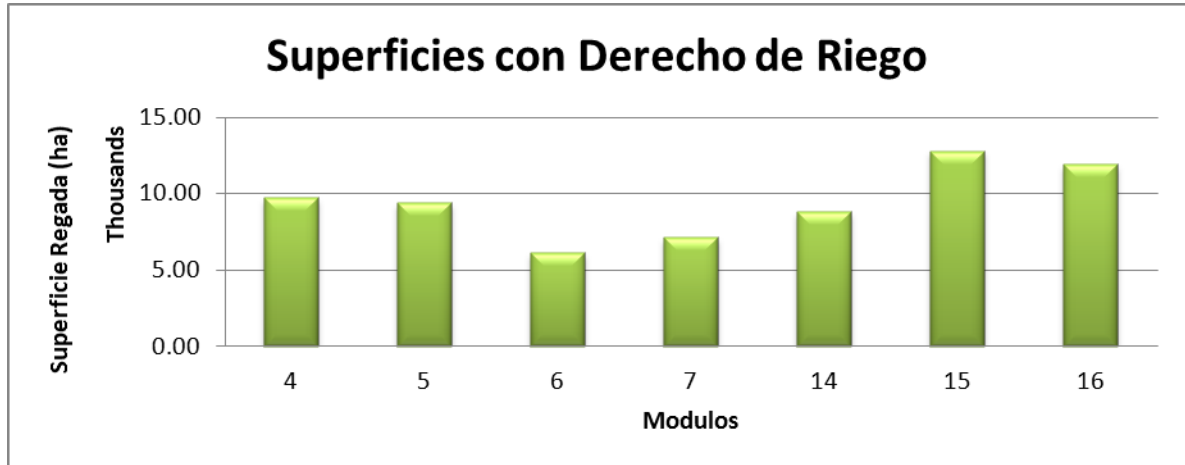


Figura 3.13. Asignación de derechos de riego.

Fuente de datos: Departamento de Estadística Agrícola 2006-2007, CONAGUA.

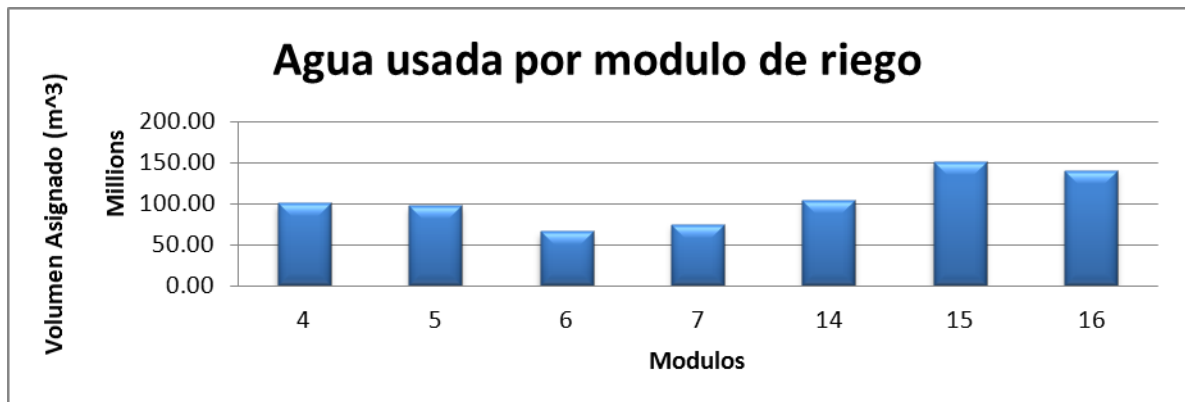


Figura 3.14. Agua usada por módulo de riego.

Fuente de datos: Departamento de Estadística Agrícola 2006-2007, CONAGUA.

Eficiencia en la conducción del Canal Independencia.

Actualmente el Canal Independencia es la fuente de suministro para la zona norte del D.R. 014, Rio Colorado y posee una infraestructura hidráulica tales como compuertas radiales, canales parshalls y sifones, el método de medición que utilizan

es el de carga piezometrica mejor conocido como tirante. Las eficiencias de conducción que presenta este canal son las siguientes:

Tabla 3.7. Eficiencia en la conducción del Canal Independencia.

Mes	Eficiencia Sistema (%)
Octubre	82.13
Noviembre	83.86
Diciembre	84.15
Enero	87.14
Febrero	89.45
Marzo	89.29
Abril	88.41
Mayo	86.65
Junio	86.76
Julio	90.54
Agosto	87.69
Septiembre	82.86
Total Año=	87

Fuente de datos: Hidrométricos primera unidad de riego 2008-2009.

Estado actual de la evaluación operativa del canal.

El Canal Independencia fue construido en el periodo de 1971 a 1973 por la Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH) y ha venido operando en forma continua hasta el día hoy. El Canal Independencia tiene una longitud de 56.75 km y este se alimenta de los Bocatomas Norte y Sur del Canal Principal (Reforma), este canal está construido los primeros 27 km de carpeta asfáltica la cual concluye hasta llegar al represo Benassini (Figura 2), a partir del represo mencionado el material de construcción es de concreto hidráulico.

Las características generales del Canal Independencia en los primeros 27 kilómetros son las siguientes:

El caudal máximo es de 40 metros cúbicos por segundo, abasteciendo a una superficie de riego: 35,000 ha y teniendo una longitud: 27 kilómetros. Sus dimensiones geométricas son las siguientes, anchura de plantilla: 3.5 a 8.0 metros, tirante máximo: 2.6 m, taludes internos: 2:1 esto se ve en la Figura 3.15.

Las características generales del Canal Independencia después del represo Benassini hasta la derivación hacia la planta potabilizadora número de dos de la CESPMM son las siguientes:

El caudal máximo es de 29 metros cúbicos por segundo, teniendo una longitud: 29.75 kilómetros. Sus dimensiones geométricas son las siguientes, anchura de plantilla: 2.1 a 4.5 metros, tirante máximo: 2.25 m, taludes internos: 2:1 (Planos de Proyecto SRH 1971) .



Figura 3.15. Canal Independencia en proceso de terminación.

Fuente de datos: Aplicación del Concreto Asfaltico en Canales y Presas Orozco, 2008.

Análisis sobre caudales de conducción.

Debido a los usuarios que dependen del Canal Independencia, los caudales que maneja son variables, pero el periodo de gastos máximos están muy marcados en el transcurso del año y principalmente son tres:

El primer periodo es para abastecer al ciclo agrícola de Otoño Invierno, que es donde se sembró principalmente Trigo y Hortalizas de acuerdo a estadísticas proporcionadas por la Secretaria de Fomento Agropecuario (SEFOA).

El segundo periodo es para abastecer al ciclo agrícola de Primavera-Verano que es donde se sembró principalmente Algodón. Sorgo y Hortalizas de acuerdo a estadísticas proporcionadas por la Secretaria de Fomento Agropecuario (SEFOA).

El tercer periodo es para abastecer el agua de uso urbano de la Ciudad de Mexicali en el periodo de verano que inicia a partir de Junio hasta mediados de Septiembre.

Problemática por el Canal Todo Americano.

Ante la demanda creciente del uso doméstico de agua en las ciudades del sur de California, el gobierno de los Estados Unidos de América, ordenó la impermeabilización del Canal Todo Americano, no sin antes responder a serias demandas de organizaciones no gubernamentales principalmente de México y de los propios Estados Unidos; sin embargo, por decreto de la Administración del presidente George W. Bush con la votación a favor del Senado de los Estados Unidos, se autorizó su revestimiento, así de esta forma en el año del 2006, se iniciaron los trabajos en una longitud de 37 km, los cuales fueron concluidos durante el año 2009.

Debido al revestimiento de este canal, se estima que se dejaron recargar 72.0 millones de metros cúbicos anuales al acuífero del Valle de Mexicali, representando

poco más del 10% de la aportación o recarga del acuífero y en un rango de 2.0 a 3.0 metros cúbicos de agua por segundo dejarán de escurrir por el Dren de la Mesa.

Los principales módulos afectados serían el No. 4, con una superficie de riego por pozos de 13,420 has y No. 16 con una superficie de riego por pozos de 445 has, que se han venido regando anualmente, permitiendo con esto el establecimiento de cultivos desde el Dren de la Mesa, los cuales dejarían de aprovecharse a consecuencia de esta acción (SEFOA 2009).

Capítulo 4

RESULTADOS DEL ESTUDIO.

Introducción.

El desarrollo de este capítulo se realizó con el marco metodológico que se estableció en los capítulos previos, en donde se elaboró una retrospectiva de la problemática del agua en todos los niveles y proporciono un panorama desde un enfoque más integral, ya que permitió comprender la variable de estudio desde varios niveles de aplicación.

Se tomaron los fundamentos de las leyes que rigen la evaporación, infiltración, e hidráulica, ya que en el análisis fueron necesarios.

El entorno geográfico y natural de la zona de estudio es muy importante, porque cada lugar tiene características muy particulares a pesar de que las variables que se midan sean las mismas, por eso es importante apoyarnos de herramientas como estaciones climatológicas, estudios hidrológicos logrando con esto elaborar un esquema de la problemática del agua de la conducción de agua en canales abiertos.

Gastos de operación en el Canal Independencia.

Una parte fundamental para estimar las pérdidas por evaporación e infiltración, en la conducción del agua por el canal independencia, es disponer con los datos de operación diaria. Esta información se puede encontrar en los hidrométricos que manejan las unidades de riego.

En hidrometría se elaboran anuarios con la información sobre niveles, caudales en ríos, caudales en canales y embalses, recopilándose por los organismos operadores del agua. Para conocer el caudal o gasto de operación mínimo, máximo y promedio se dio tratamiento estadístico a los gastos de operación del Canal Independencia que comprendieron el ciclo agrícola 2008-2009 del D.R. 014 Río Colorado.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.1:

Tabla 4.1. Caudales de operación para el Canal Independencia.

Selección de Gastos (lt/s)	
Media	16,844.72
Mínimo	4,222.00
Máximo	27,802.00

Fuente: Este estudio.

Los caudales de operación se presentan en la Figura 4.1.

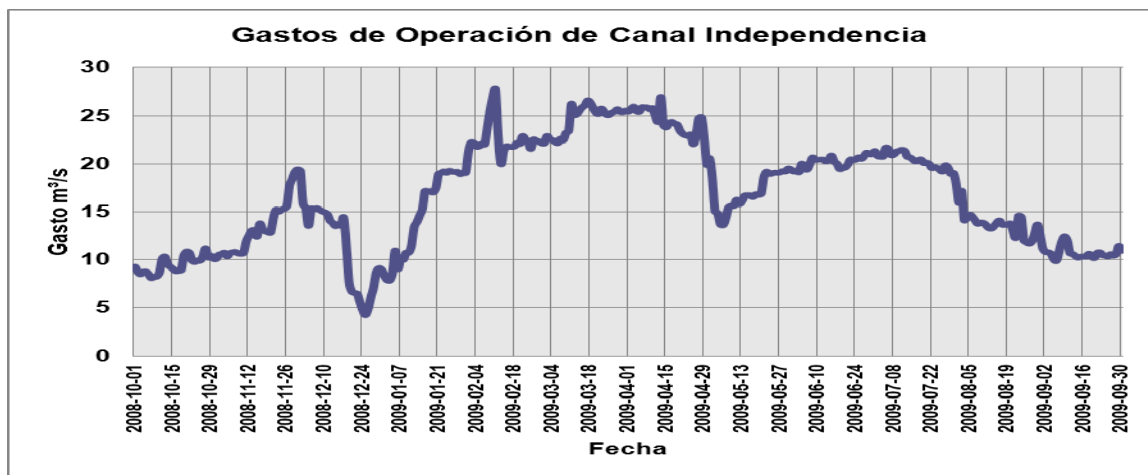


Figura 4.1. Hidrométricos para el Canal Independencia 2008-2009.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la primera unidad de riego.

Una vez conocidos los gastos con los cuales opera el Canal Independencia, se procedió a la simulación hidráulica y posteriormente a la calibración de este modelo. La simulación hidráulica se realizó usando el paquete computacional conocido como "HEC-RAS" (Hydrologic Engineering Center-River Analysis). Este paquete permitió

simular las diferentes condiciones con las cuales opera el Canal Independencia y proporcionó las variables del comportamiento hidráulico de este canal.

Secciones del Canal Independencia para la simulación.

La simulación hidráulica se dividió en dos segmentos, el primer segmento fue para el Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760, el cual se alimenta del Canal Alimentador Central por sus dos bocatomas el Norte y Sur (Figuras 4.2 y 4.3), y el segundo segmento fue para el Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623, al igual que en el caso anterior este se alimenta por dos bocatomas derivadas del represo Benassini, tal como se muestran en las Figuras 4.8 y 4.9.



Figura 4.2. Bocatoma Norte Canal Independencia derivado del Canal Alimentador Central.



Figura 4.3. Bocatoma Sur Canal Independencia derivado del Canal Alimentador Central.

Fuente: Elaboración propia.

Las secciones para la simulación hidráulica se muestran en las Figuras 4.4 a la 4.7 y de la 4.10 a la 4.12.

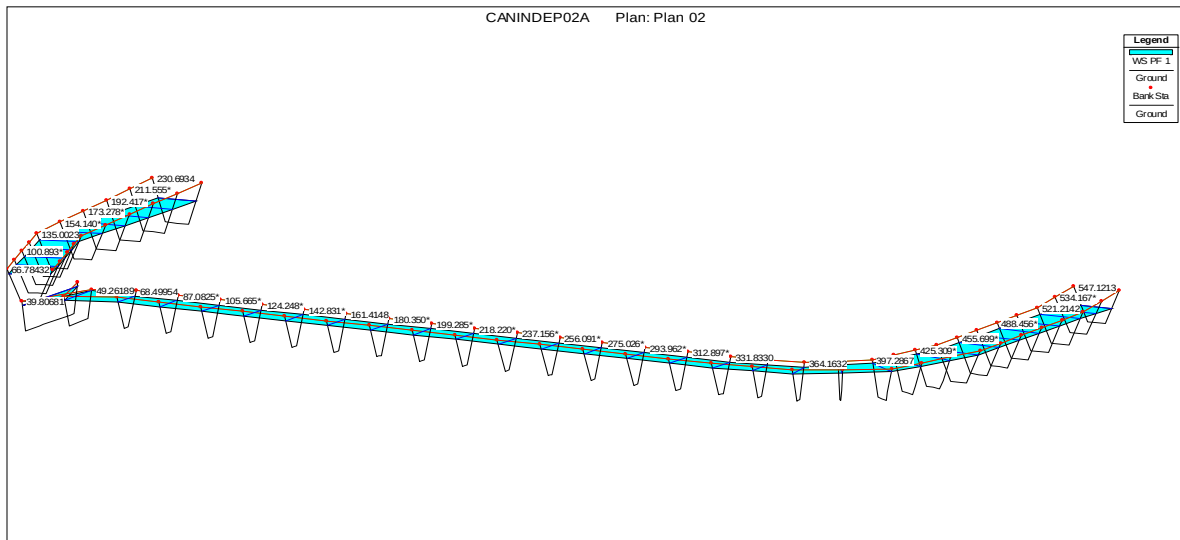


Figura 4.4. Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760.
Fuente: Este estudio.

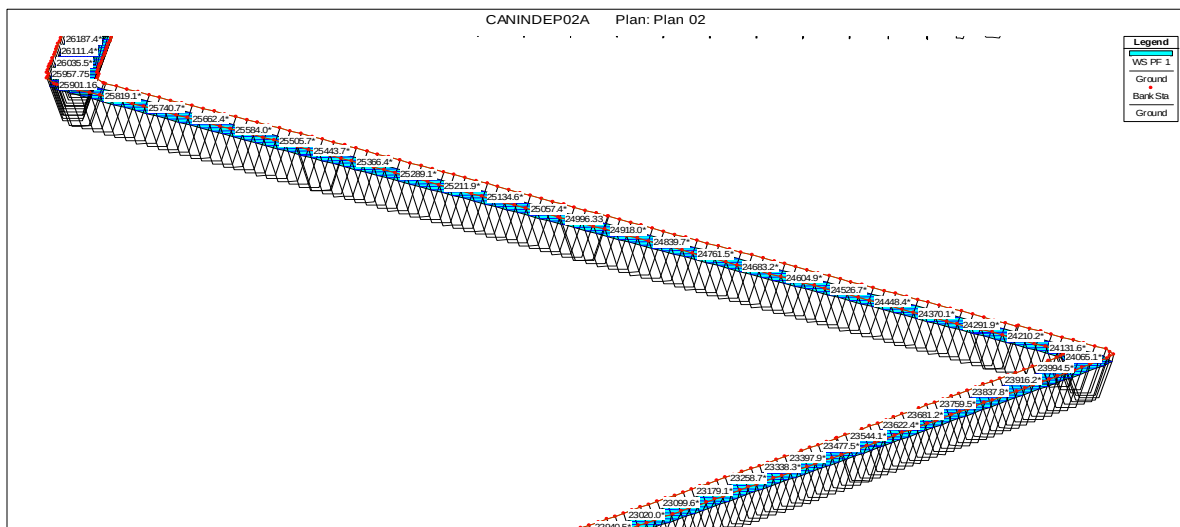


Figura 4.5. Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760.
Fuente: Este estudio.

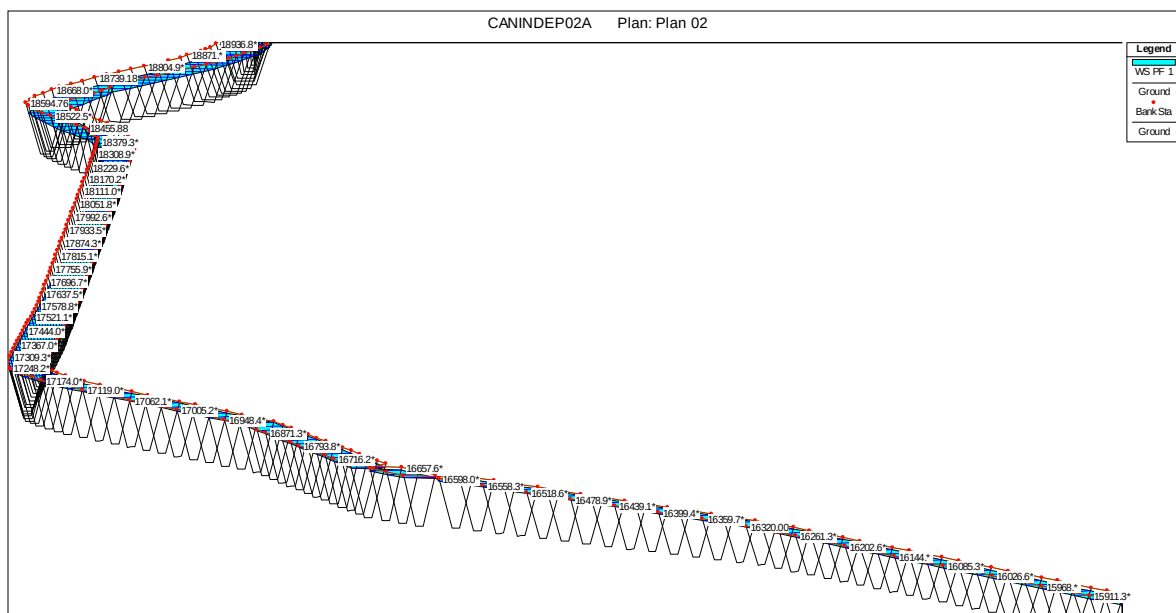


Figura 4.6. Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760.
Fuente: Este estudio.

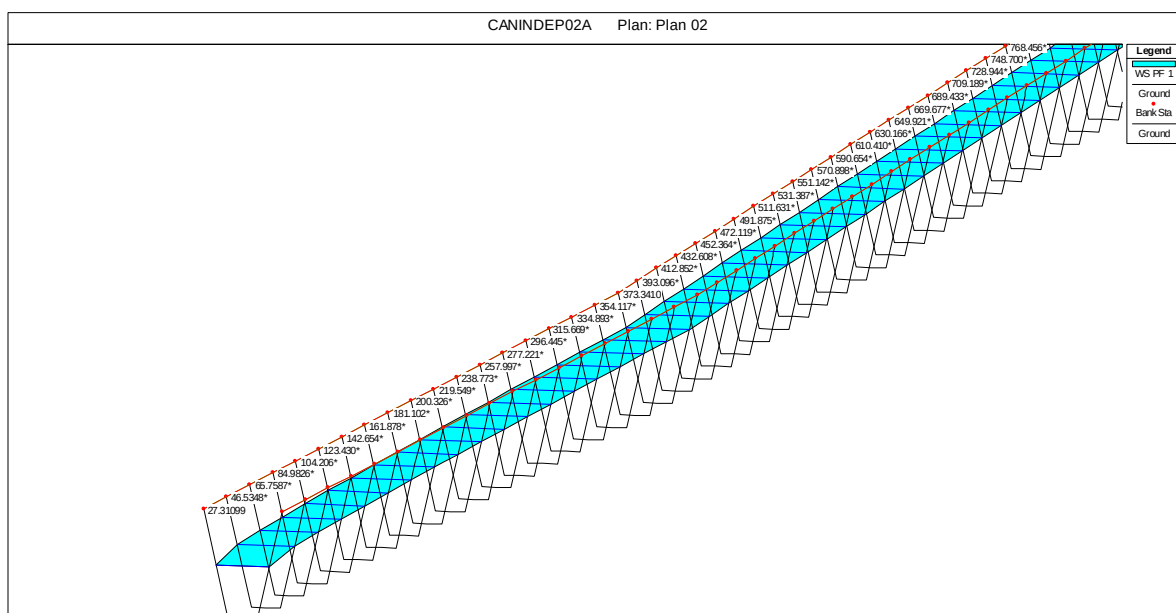


Figura 4.7. Canal Independencia en Concreto Asfaltico del Km 0+000 al 26+760.
Fuente: Este estudio.



Figuras 4.8 y 4.9. Bocatomas Sur y alimentación de represo Benassini para el Canal Independencia alimentando el tramo de Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623.

Fuente: Elaboración propia.

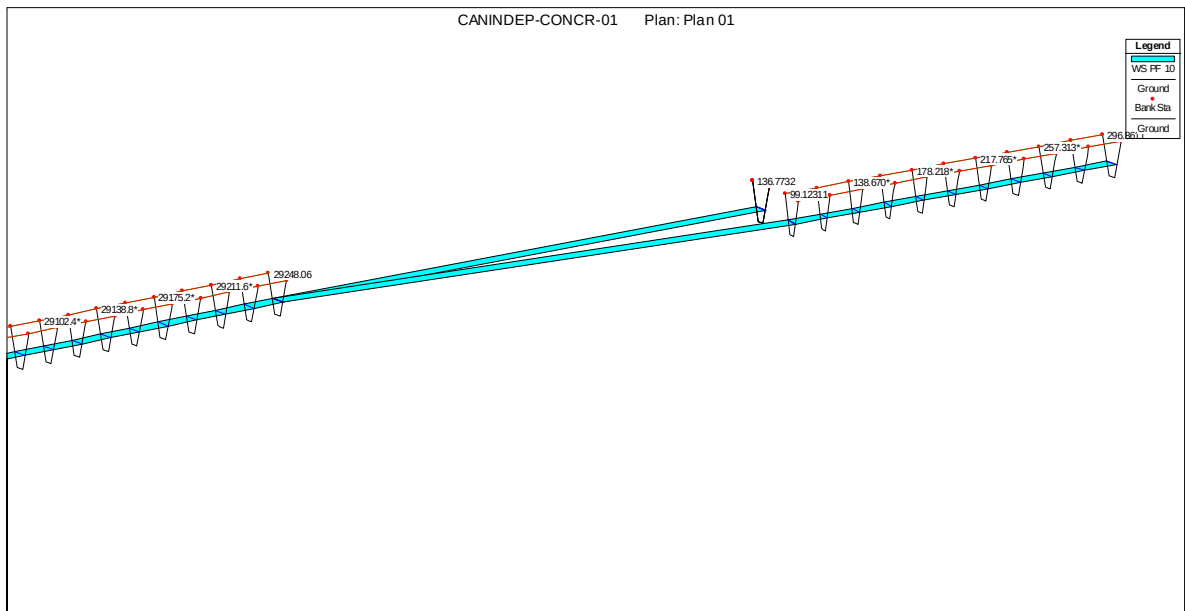


Figura 4.10. Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623.

Fuente: Este estudio.

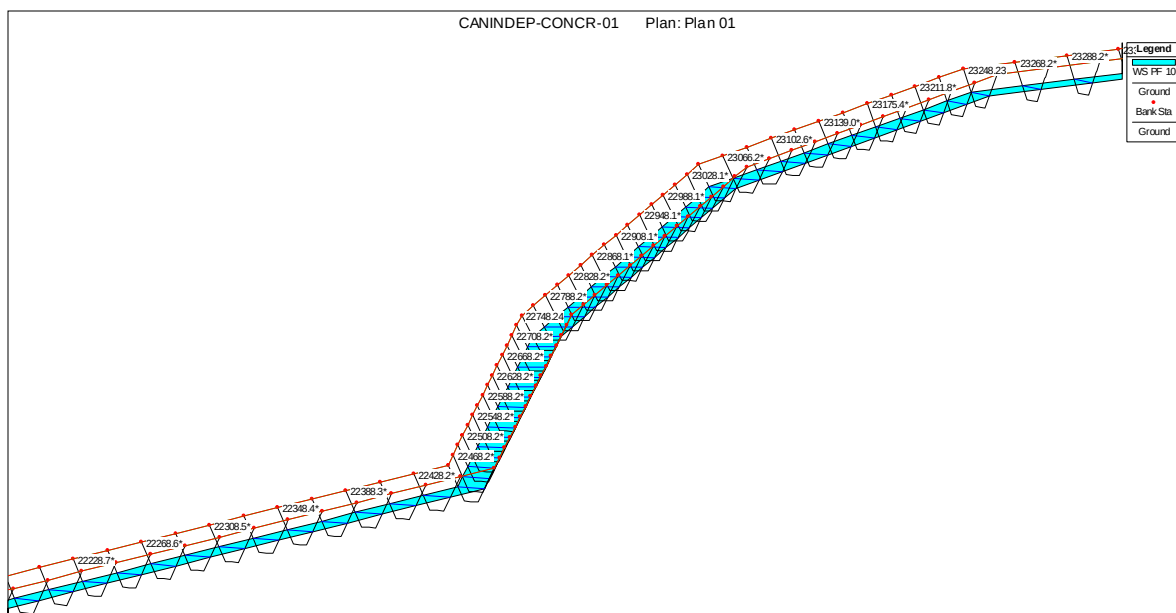


Figura 4.11. Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623.
Fuente: Este estudio.

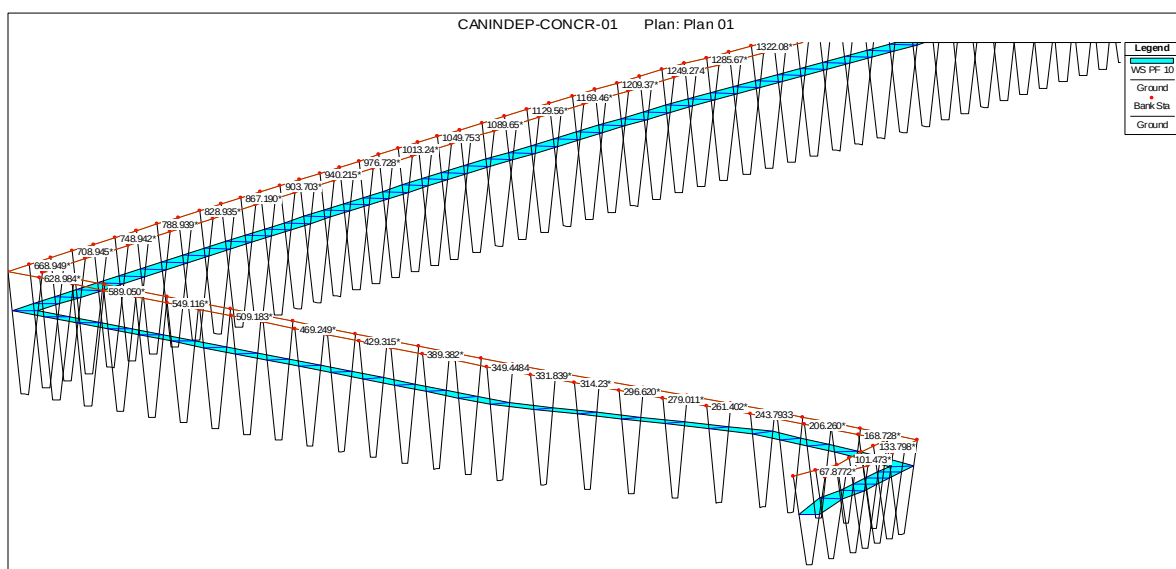


Figura 4.12. Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623.
Fuente: Este estudio.

Validación del Modelo.

En la primera simulación utilizando un factor de manning de 0.015, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Comparación de los resultados la simulación con respecto al proyecto corrida 1.

Parametro	Proyecto	Simulado	Error (%)
Radio Hidraulico (m)	1.75	1.50	14.22
Velocidad (m/s)	1.19	1.45	22.35
Espejo de Agua (m)	18.40	17.85	2.99
Libre Bordo (m)	0.50	0.56	12.00
Perimetro Mojado (m)	19.63	18.76	4.42

Fuente: Este estudio.

En la segunda simulación con un factor de rugosidad de manning de 0.016, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Comparación de los resultados la simulación con respecto al proyecto corrida 2.

Parametro	Proyecto	Simulado	Error (%)
Radio Hidraulico (m)	1.75	1.54	11.93
Velocidad (m/s)	1.19	1.38	16.45
Espejo de Agua (m)	18.40	18.21	1.03
Libre Bordo (m)	0.50	0.48	4.00
Perimetro Mojado (m)	19.63	19.16	2.38

Fuente: Este estudio.

Una vez calibrado el modelo de simulación tomando como referencia el libre bordo que marcan las especificaciones de proyecto, se inició el cálculo de la evaporación de agua.

Para estimar la cantidad de agua evaporada es necesario conocer la superficie de área expuesta, que es directamente proporcional al volumen de agua que circula. En

canales abiertos a mayor volumen de agua circulado mayor será la superficie de agua expuesta y el parámetro de medición es conocido como superficie de espejo. La superficie de espejo es el producto del espejo de agua por su longitud los cuales se muestran en las Tablas 4.4 y 4.5 así como las Figuras 4.13 y 4.14.

Tabla 4.4. Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Tramo	Estación	Perfil	Q Total (m3/s)	Ancho de Espejo (m)	Perímetro Mojado (m)
Al iniciar Canal Independencia Concreto Asfáltico					
0+245 AL 26+700	26459.64	PF 1	40.67	18.21	19.16
0+245 AL 26+700	26459.64	PF 2	27.8	16.18	16.94
0+245 AL 26+700	26459.64	PF 3	16.01	13.81	14.35
0+245 AL 26+700	26459.64	PF 4	4.22	10.3	10.51
Al finalizar Canal Independencia Concreto Asfáltico					
0+245 AL 26+700	27.31099	PF 1	40.67	11.96	12.6
0+245 AL 26+700	27.31099	PF 2	27.8	10.86	11.37
0+245 AL 26+700	27.31099	PF 3	16.01	9.62	9.99
0+245 AL 26+700	27.31099	PF 4	4.22	7.85	8.01

Fuente: Este estudio.

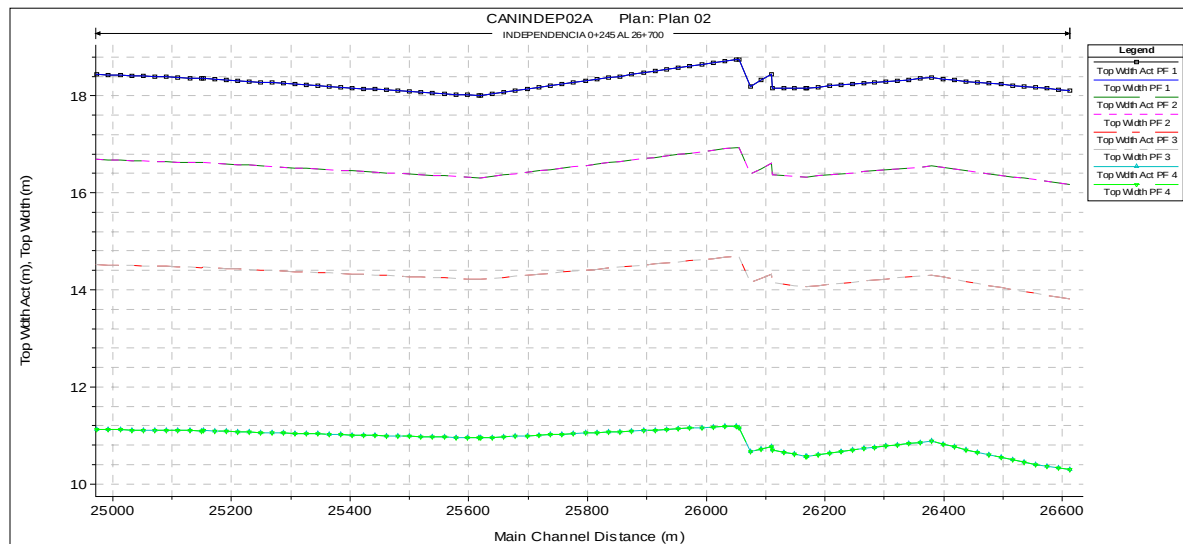


Figura 4.13. Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.5. Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para para los diferentes Gastos de Operación.

Tramo	Estación	Perfil	Q Total (m3/s)	Ancho de Espejo (m)	Perímetro Mojado (m)
Al iniciar Canal Independencia Concreto Hidráulico					
EJE	29248.06	PF 1	30	13.75	14.84
EJE	29248.06	PF 2	28	13.45	14.5
EJE	29248.06	PF 3	20	12.1	13
EJE	29248.06	PF 4	12	10.4	11.1
EJE	29248.06	PF 5	11	10.15	10.81
EJE	29248.06	PF 6	10	9.88	10.52
EJE	29248.06	PF 7	8	9.3	9.87
EJE	29248.06	PF 8	7	8.98	9.51
EJE	29248.06	PF 9	6.6	8.85	9.36
EJE	29248.06	PF 10	6	8.64	9.13
Al finalizar Canal Independencia Concreto Hidráulico					
EJE	50.44422	PF 6	10	6.73	7.1
EJE	50.44422	PF 7	8	6.17	6.5
EJE	50.44422	PF 8	7	5.87	6.18
EJE	50.44422	PF 9	6.6	5.74	6.04
EJE	50.44422	PF 10	6	5.55	5.83

Fuente: Este estudio.

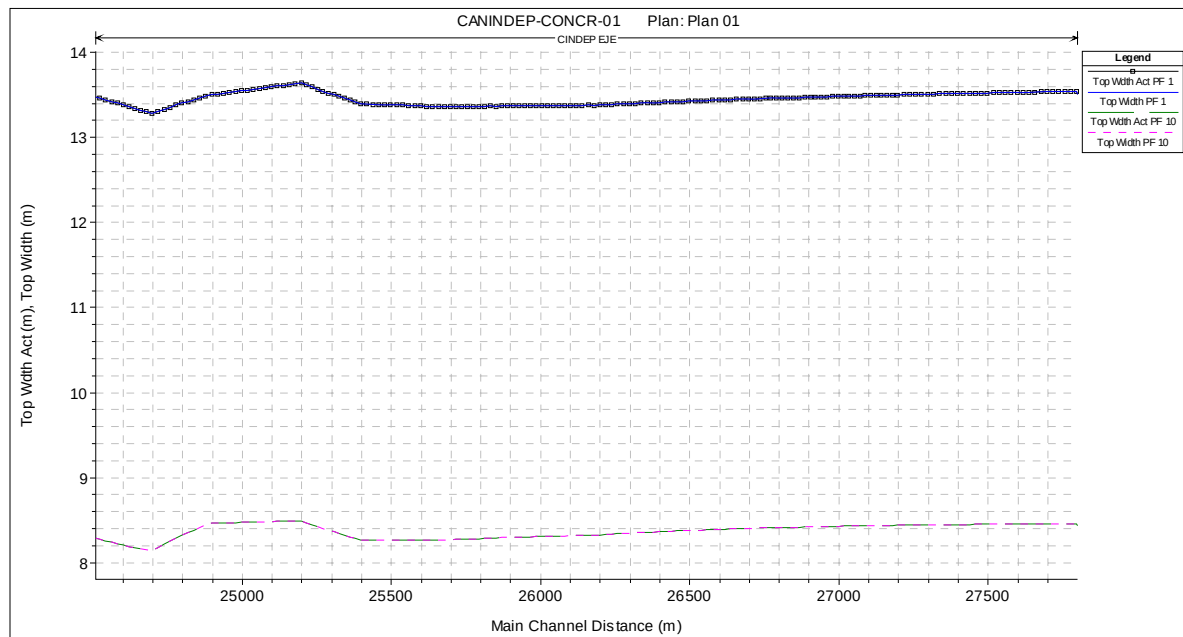


Figura 4.14. Ancho del espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Superficie de Área Expuesta a Evaporación.

Una vez conocidos la longitud del Canal Independencia así como el ancho del espejo de agua para cada segmento se procedió a calcular la superficie de agua expuesta y como es de esperarse esta presenta diferentes valores para cada caudal, y cada sección geométrica. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 4.6 a la 4.9.

Tabla 4.6. Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Tramo	Estación	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Longitud del Eje (m)	Ancho de Espejo (m)	Superficie de espejo (m ²)
INDEPENDENCIA	26459.64	PF 1	40.67	19.52	18.21	355.46
INDEPENDENCIA	26440.1*	PF 1	40.67	19.52	18.23	355.85
INDEPENDENCIA	26420.6*	PF 1	40.67	19.52	18.25	356.24
INDEPENDENCIA	26401.0*	PF 1	40.67	19.52	18.27	356.63
INDEPENDENCIA	26459.64	PF 2	27.8	19.52	16.18	315.83
INDEPENDENCIA	26440.1*	PF 2	27.8	19.52	16.21	316.42
INDEPENDENCIA	26420.6*	PF 2	27.8	19.52	16.24	317.00
INDEPENDENCIA	26401.0*	PF 2	27.8	19.52	16.27	317.59
INDEPENDENCIA	26381.5*	PF 2	27.8	19.52	16.3	318.18
INDEPENDENCIA	26459.64	PF 3	16.01	19.52	13.81	269.57
INDEPENDENCIA	26440.1*	PF 3	16.01	19.52	13.85	270.35
INDEPENDENCIA	26420.6*	PF 3	16.01	19.52	13.89	271.13
INDEPENDENCIA	26401.0*	PF 3	16.01	19.52	13.93	271.91
INDEPENDENCIA	26381.5*	PF 3	16.01	19.52	13.97	272.69

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.7. Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Caudal (m ³ /s)	Superficie de Agua (m ²)
40.67	449,520
27.8	403,106
16.01	348,340
4.22	263,288

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.8. Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto

Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Tramo	Estación	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Longitud del Eje (m)	Ancho de Espejo (m)	Superficie de espejo (m ²)
CINDEP	29248.06	PF 1	30	200.24	13.75	2,753.30
CINDEP	29047.81	PF 1	30	300.42	13.76	4,133.78
CINDEP	28747.39	PF 1	30	844.83	13.78	11,641.76
CINDEP	24747.78	PF 2	28	350.03	12.94	4,529.39
CINDEP	24397.69	PF 2	28	150.2	13.33	2,002.17
CINDEP	24247.51	PF 2	28	199.92	13.35	2,668.93
CINDEP	21299.54	PF 3	20	600.52	12.34	7,410.42
CINDEP	20699.06	PF 3	20	399.68	12.4	4,956.03
CINDEP	15424.8	PF 4	12	176	12.74	2,242.24
CINDEP	15248.77	PF 4	12	600	11.07	6,642.00
CINDEP	14648.78	PF 4	12	299.52	10.8	3,234.82
CINDEP	6249.338	PF 6	10	123.72	8.94	1,106.06
CINDEP	6125.618	PF 6	10	275.13	9.06	2,492.68
CINDEP	5250.313	PF 6	10	599.64	10.85	6,506.09
CINDEP	4650.675	PF 7	8	205.93	10.27	2,114.90
CINDEP	4444.751	PF 7	8	194.88	9.68	1,886.44
CINDEP	2674.328	PF 8	7	25.24	7.64	192.83
CINDEP	2649.093	PF 8	7	399.84	7.7	3,078.77
CINDEP	149.9618	PF 8	7	64.65	7.02	453.84
CINDEP	85.31034	PF 8	7	34.87	6.99	243.74

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.9. Superficie de espejo de agua para el Canal Independencia en Concreto

Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Caudal (m ³ /s)	Superficie de Agua (m ²)
30	344,431
6	254,273

Fuente: Este estudio.

Evaporación.

El método de cálculo para evaluar la evaporación del Canal Independencia utilizó datos climatológicos. Existen básicamente tres tipos de modelos: balance de energía, transferencia de masa o aerodinámico y el modelo combinado o de Penman que relaciona los dos anteriores.

Para la estimación de las pérdidas por evaporación se realizó una recopilación de información climatológica la cual se obtuvo de estaciones ubicadas en la zona, y se complementó con la información hidrométrica de Canal Independencia. Al obtener la evaporación para la zona se validó tomando como referencia los datos de la estación climatológica ubicada en el poblado de Bataques a cargo de la Comisión Nacional del Agua.

Validación de evaporación.

Para la evaporación calculada se estimó el grado de relación existente con la medida en campo y se obtuvo un coeficiente de relación R^2 del 98.75%. Los resultados que se obtuvieron muestran un buen ajuste, con un error promedio del 7.5%, un error máximo del 19.5% y un error mínimo del 0.9%, como se muestra en la Figura 4.15.

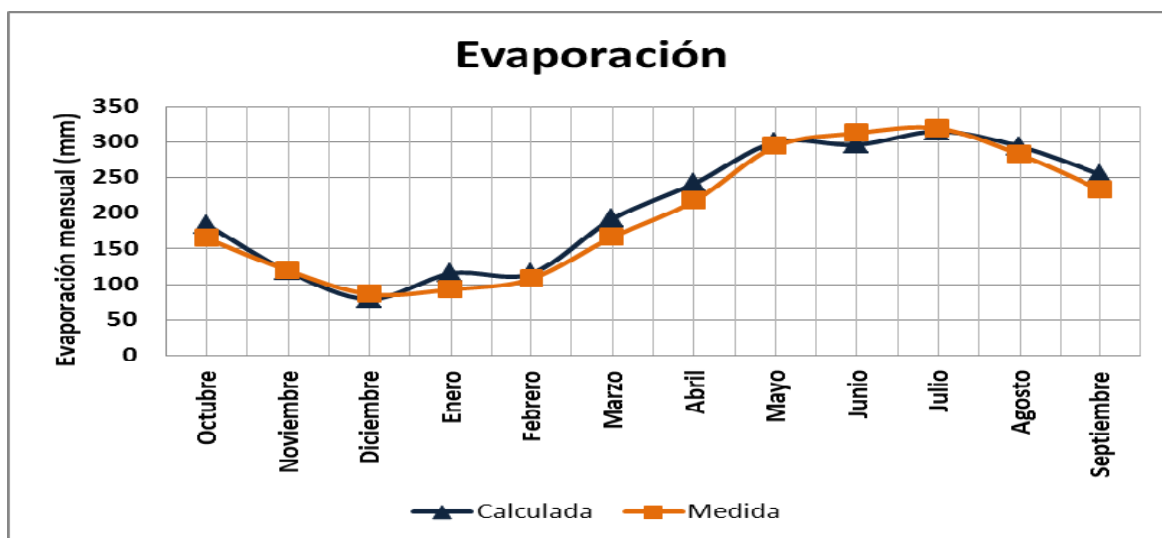


Figura 4.15. Correlación de Evaporación calculada y Medida.

Fuente: Este estudio.

Una vez validada la evaporación por día que se presenta en la zona se elaboró el cálculo de la pérdida de agua por este fenómeno utilizando la superficie de agua expuesta previamente calculada para cada uno de los caudales y para cada sección del Canal Independencia, como se aprecia en las Tablas 4.10, 4.11 y Figuras 4.16, 4.17.

Tabla 4.10. Tabla de Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

	40 m³/s	27 m³/s	16 m³/s	4 m³/s
Fecha	Evaporación de Agua (m³/mes)	Evaporación de Agua (m³/mes)	Evaporación de Agua (m³/mes)	Evaporación de Agua (m³/mes)
Octubre	79,708	71,478	61,767	46,685
Noviembre	51,080	45,806	39,583	29,918
Diciembre	34,065	30,548	26,398	19,952
Enero	50,470	45,259	39,110	29,560
Febrero	51,787	46,440	40,131	30,332
Marzo	86,275	77,367	66,855	50,532
Abril	108,528	97,322	84,100	63,566
Mayo	134,655	120,751	104,346	78,868
Junio	133,071	119,331	103,119	77,941
Julio	141,500	126,890	109,651	82,878
Agosto	131,958	118,334	102,257	77,289
Septiembre	114,378	102,568	88,633	66,992
Evaporación Anual=	1,117,474.74	1,002,094	865,948	654,514

Fuente: Este estudio.

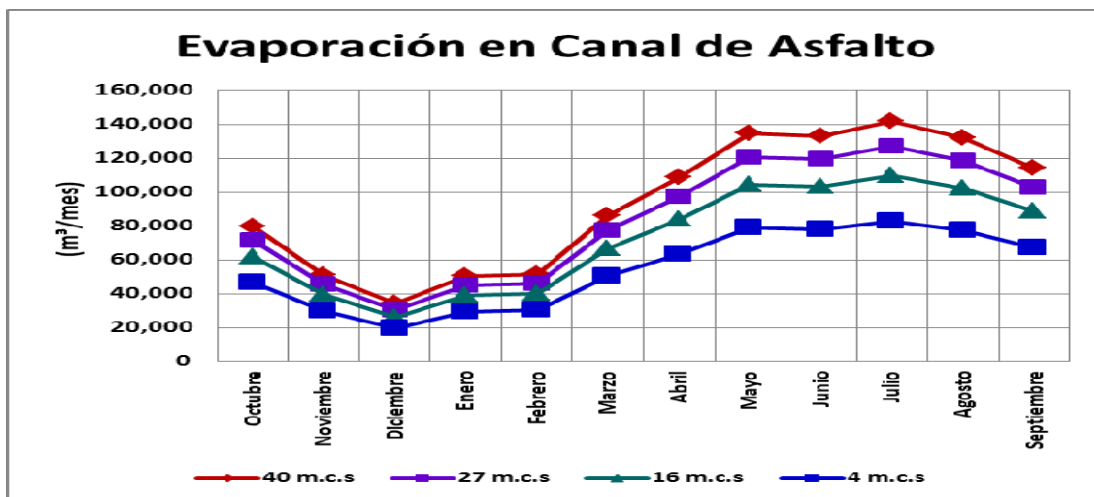


Figura 4.16. Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.11. Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

	30 m³/s	15 m³/s	8 m³/s	6 m³/s
Fecha	Evaporacion de Agua (m³/mes)	Evaporacion de Agua (m³/mes)	Evaporacion de Agua (m³/mes)	Evaporacion de Agua (m³/mes)
Octubre	61,009	53,180	49,265	45,351
Noviembre	39,097	34,080	31,571	29,063
Diciembre	26,074	22,728	21,055	19,382
Enero	38,630	33,673	31,194	28,716
Febrero	39,638	34,552	32,009	29,465
Marzo	66,035	57,561	53,324	49,087
Abril	83,068	72,408	67,078	61,749
Mayo	103,065	89,840	83,227	76,614
Junio	101,853	88,783	82,248	75,713
Julio	108,305	94,407	87,458	80,509
Agosto	101,002	88,041	81,560	75,080
Septiembre	87,546	76,311	70,694	65,077
Evaporacion Anual=	855,321.75	745,563.92	690,685.00	635,806.09

Fuente: Este estudio.

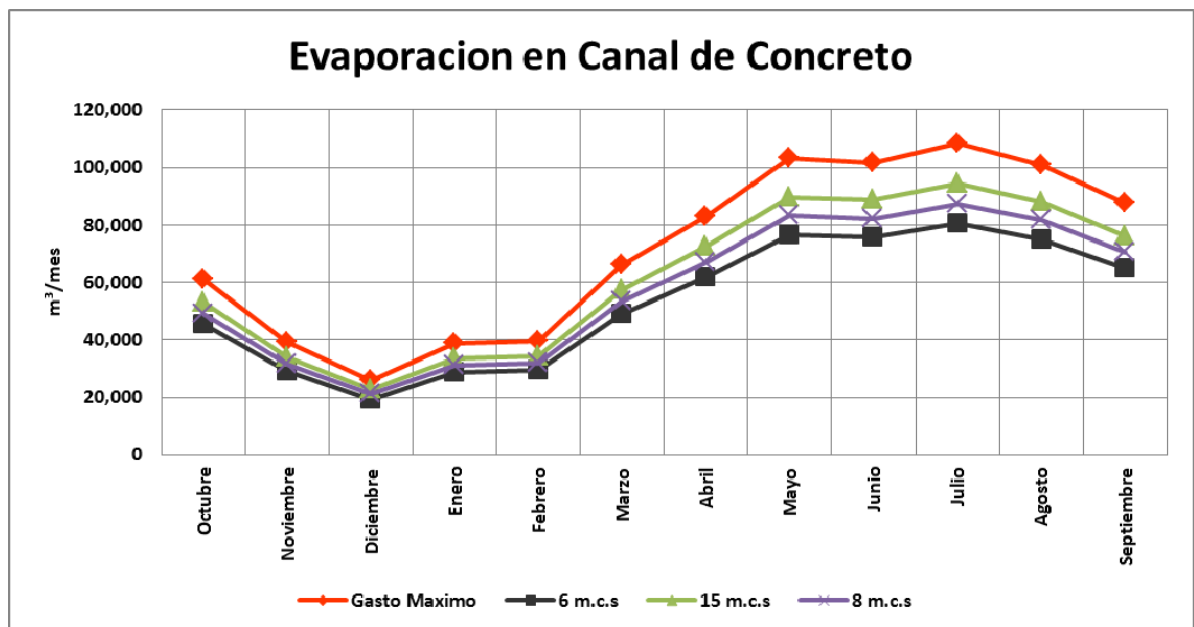


Figura 4.17. Evaporación de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Infiltración.

Para la determinación de la infiltración en este proyecto, se realizó basado en los principios de la Ley de Darcy y en los resultados obtenidos en estanques de prueba, estudio que fue realizado como anteproyecto para la construcción del Canal Independencia antes de 1971.

La ecuación establecida para estimar el caudal de infiltración es la siguiente:

$$Q_f = R (B + b) d L \quad 4.1$$

y sus variables geométricas que contiene la Ecuación 4.1 se ilustran en la Figura 4.18.

Q_f = Caudal de Infiltración
 B = Ancho en la Superficie del Agua
 L = Longitud del Tramo Considerado
 d = Tirante de Operación
 b = Proyección Horizontal del Talud
 R = Valor de Perdida Unitaria

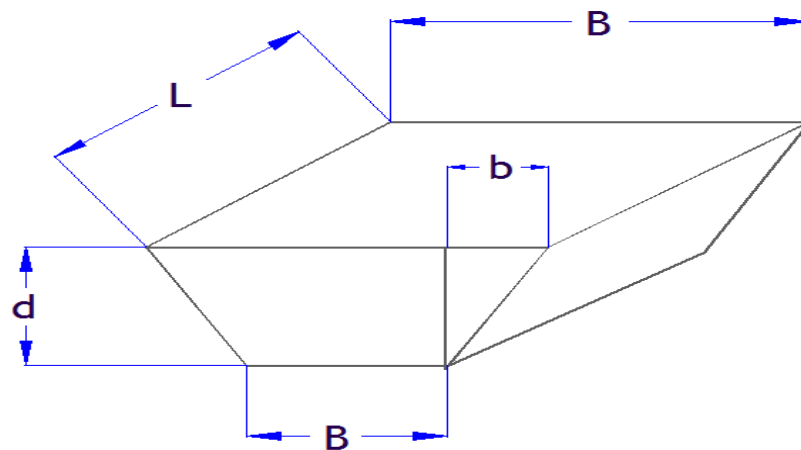


Figura 4.18. Variables geométricas para determinar el caudal de infiltración.

Fuente: Elaboración propia.

Mecanismos de la infiltración.

El fenómeno de infiltración de agua en el Canal Independencia se da principalmente en la plantilla o fondo y en los taludes, y este a su vez tiene similitud con la evaporación, ya que ambos dependen del caudal de operación, es decir a mayor volumen de agua conducido mayor será su tirante y será mayor el área expuesta para que se presente la infiltración.

Una de las ventajas de la simulación hidráulica es que proporciona los datos para variables tales como: los tirantes, los perímetros mojados y las longitudes con las cuales operan las secciones de este canal según sea el gasto que nos interese. De las Figuras 4.19 a la 4.26 se muestra esta información.

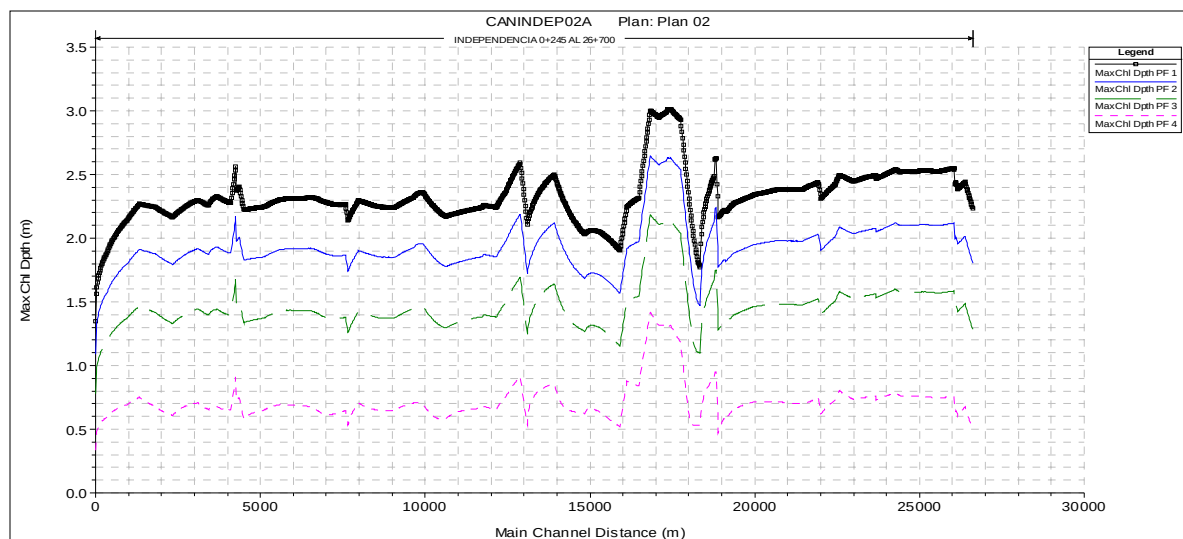


Figura 4.19. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.



Figura 4.20. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico km 13+800.



Figura 4.21. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Asfaltico km 13+800.

Fuente: Elaboración propia.

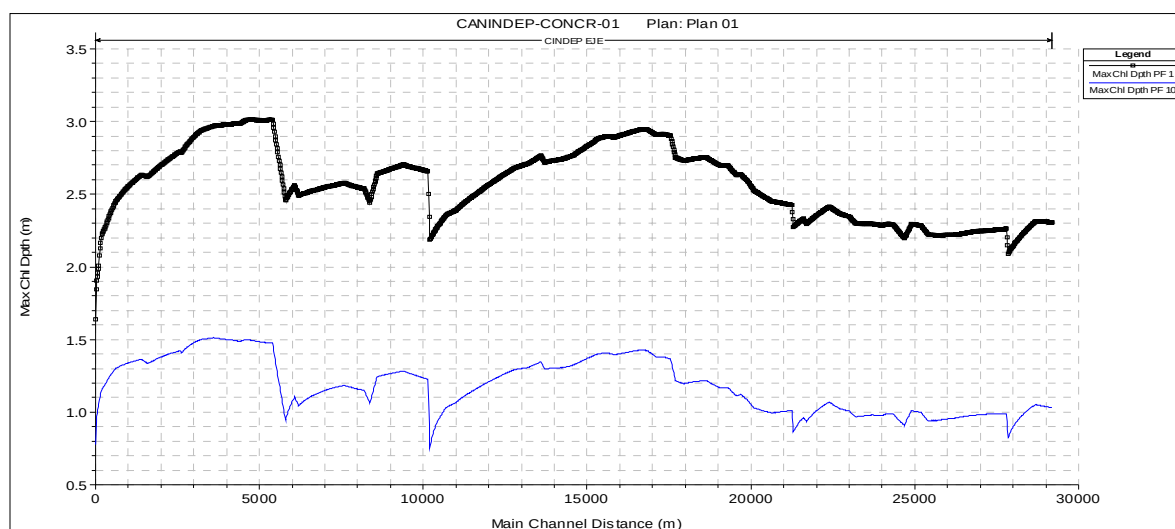


Figura 4.22. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.



Figuras 4.23. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico km 56+466.

Figuras 4.24. Tirante para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico km 56+466.

Fuente: Elaboración propia.

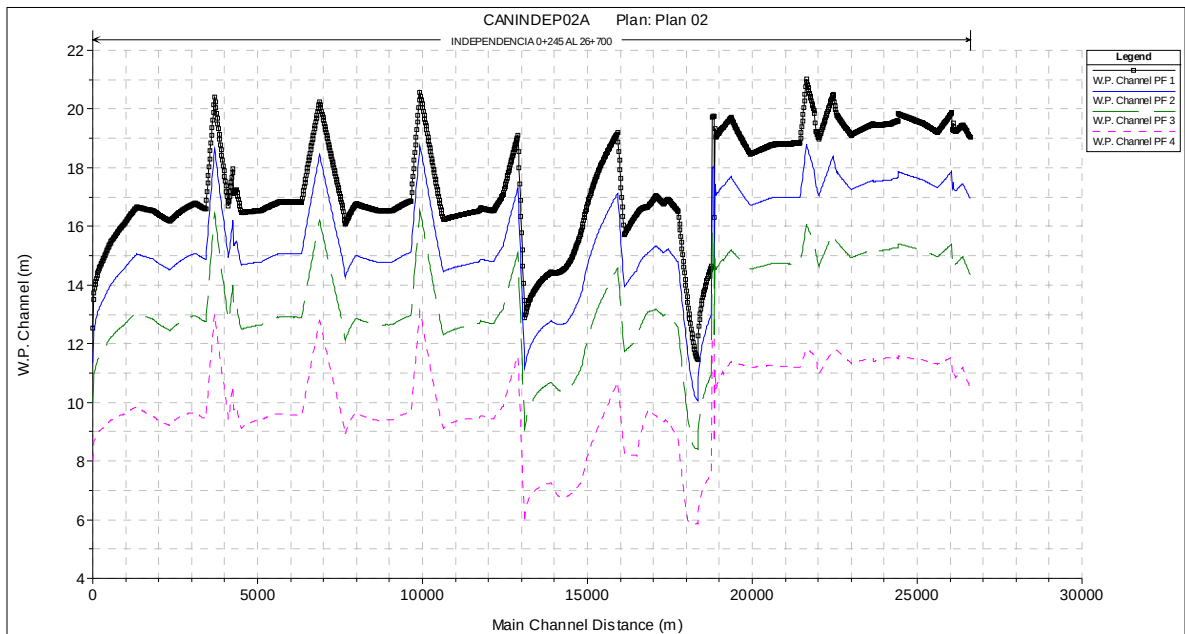


Figura 4.25. Perímetro mojado para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

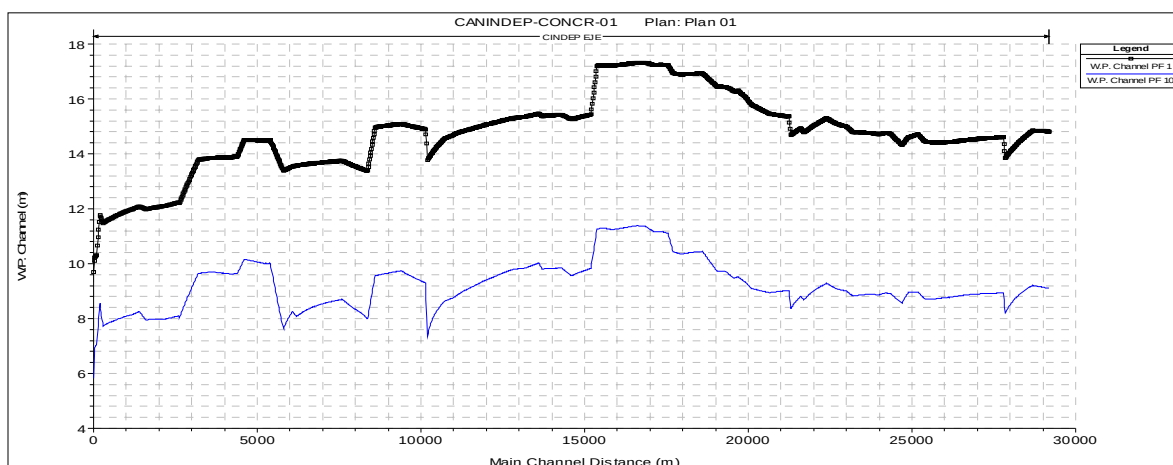


Figura 4.26. Perímetro mojado para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Una vez generada esta información con HEC-RAS se estimó el caudal de infiltración mediante una hoja de cálculo de Excel. En las tablas 4.12 a la 4.14 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 4.12. Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Gasto	Concreto Asfáltico (Año 1)			
	(m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)
Diseño	40.7	339	34	186
Max. Oper	27.8	250	25	137
Prom. Oper	16	161	16	89
Min. Oper	4	59	6	32

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.13. Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Gasto	Concreto Hidráulico (Año 1)			
	Gasto (m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)
Diseño	Máximo	2,253,594	1,126,797	1,690,196
Prom. Oper	Promedio	1,617,589	808,794	1,213,192
Min. Oper	6	981,583	490,792	736,188

Fuente: Este estudio.

Tabla 4.14. Infiltración para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 y Concreto Hidráulico del Km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Total Infiltración	Ambos Materiales (Año 1)		
Gasto	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)
Diseño	2,253,933	1,126,831	1,690,382
Max. Oper	1,617,839	808,819	1,213,329
Prom. Oper	1,617,750	808,811	1,213,280
Min. Oper	981,642	490,798	736,220

Fuente: Este estudio.

Resumen de Modelación.

Finalmente presentamos un resumen de los parámetros más importantes del modelamiento del Canal Independencia de las Figuras 4.27 a la 4.30:

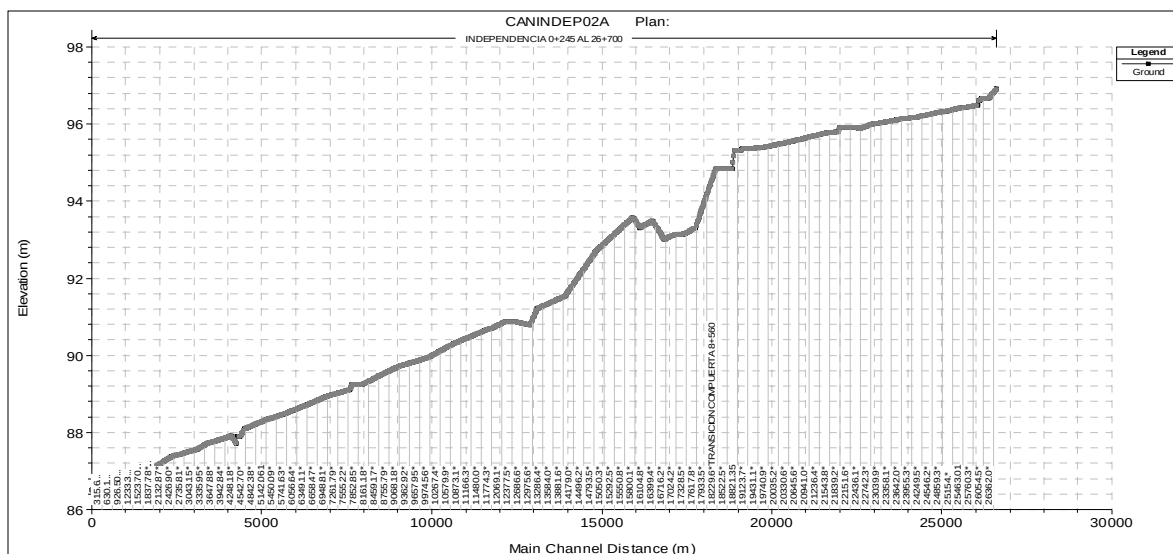


Figura 4.27. Perfil de elevación para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760.

Fuente: Este estudio.

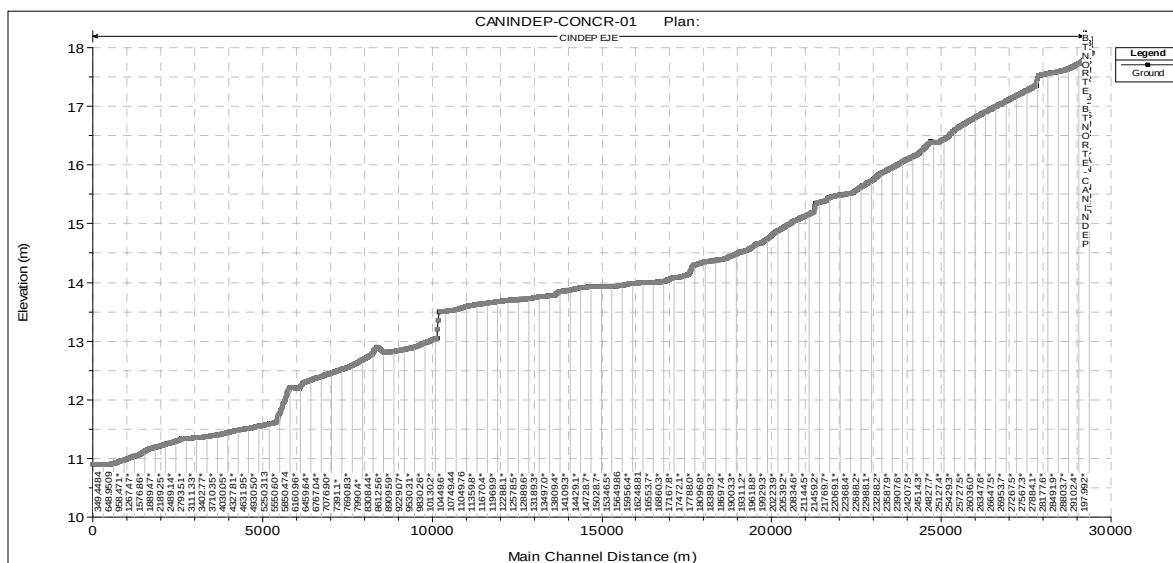


Figura 4.28. Perfil de elevación para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623.

Fuente: Este estudio.

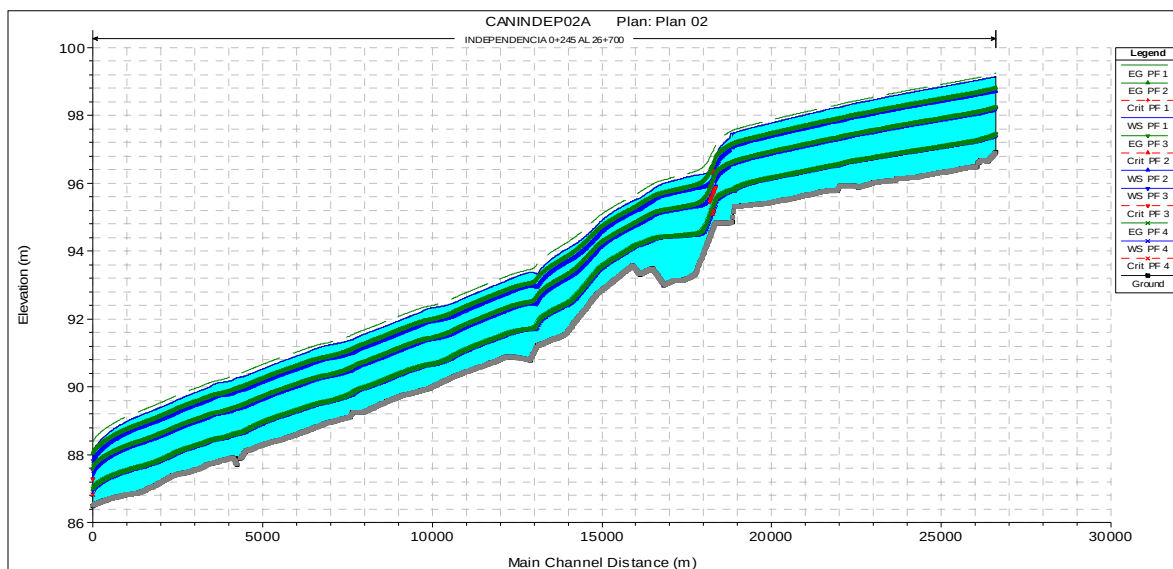


Figura 4.29. Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Asfáltico del km 0+000 al 26+760 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

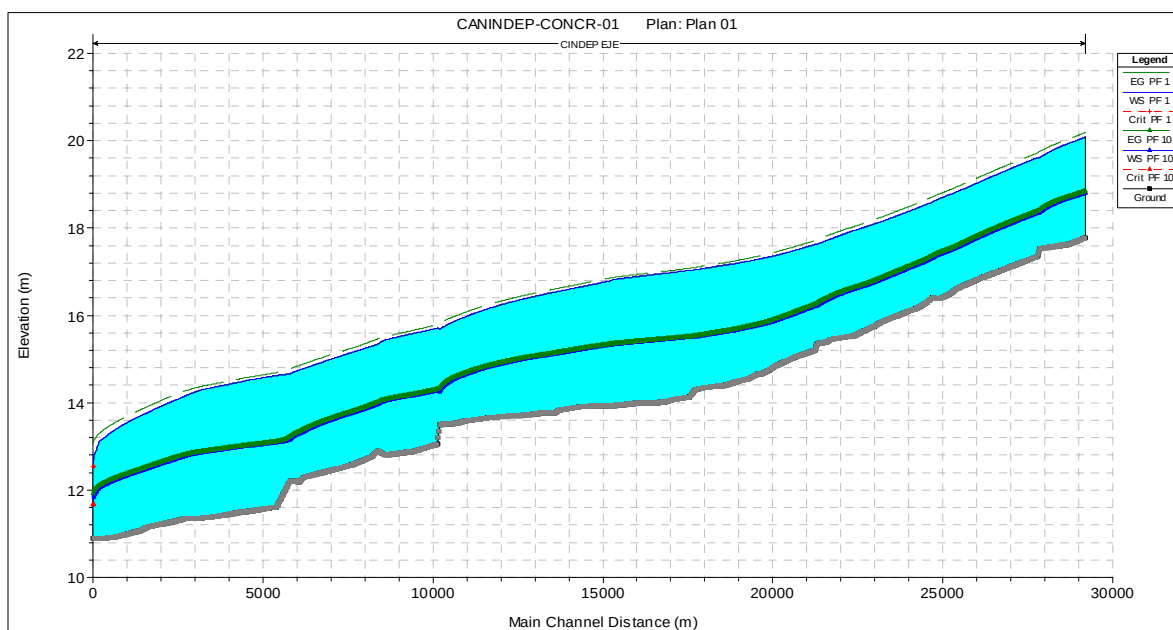


Figura 4.30. Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del km 26+955 al 56+623 para los diferentes Gastos de Operación.

Fuente: Este estudio.

Es importante presentar estos parámetros de operación, ya que estos resultados fueron considerando el Canal Independencia en buenas condiciones, y por lo tanto las paredes del material no restringen el flujo de agua, es decir tienen un número de Manning aceptable de acuerdo a las Normas de Proyecto para Obras de Alcantarillado Pluvial en el Estado de Baja California emitidas por SIDUE.

Partiendo de esta inferencia como base y considerando que las paredes del canal se encuentran deterioradas se elaboró el modelamiento hidráulico el cual se considera el estado actual del Canal Independencia, se tomó como referencia los números de Manning establecidos dentro del manual que vienen con el software de HEC-RAS así como los que indica el autor Frank M. White en su libro de Mecánica de Fluidos cuarta edición, obteniendo los siguientes resultados.

Para el caso de buena condición, se detectó que este canal si puede conducir su caudal máximo de diseño, conservando su tirante y libre bordo tal como lo indican las especificaciones de proyecto, esto se muestra en la Figura 4.31.

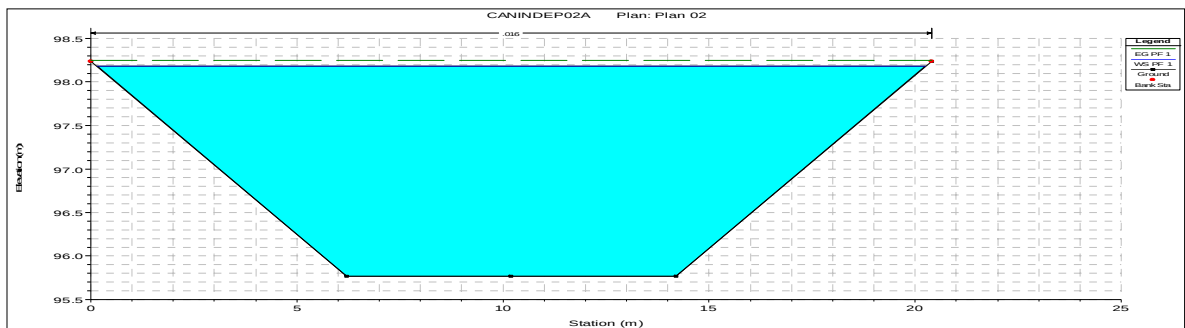


Figura 4.31. Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 4+420 al 8+560 para Gasto de 40 m³/s de Operación.

Fuente: Este estudio.

Para el caso de mala condición, se detectó que no puede conducir el caudal máximo de diseño, ya que no conserva su tirante y libre bordo e incluso se determina que en caso de conducirlo este se desbordaría tal como se muestra en la Figura 4.32.

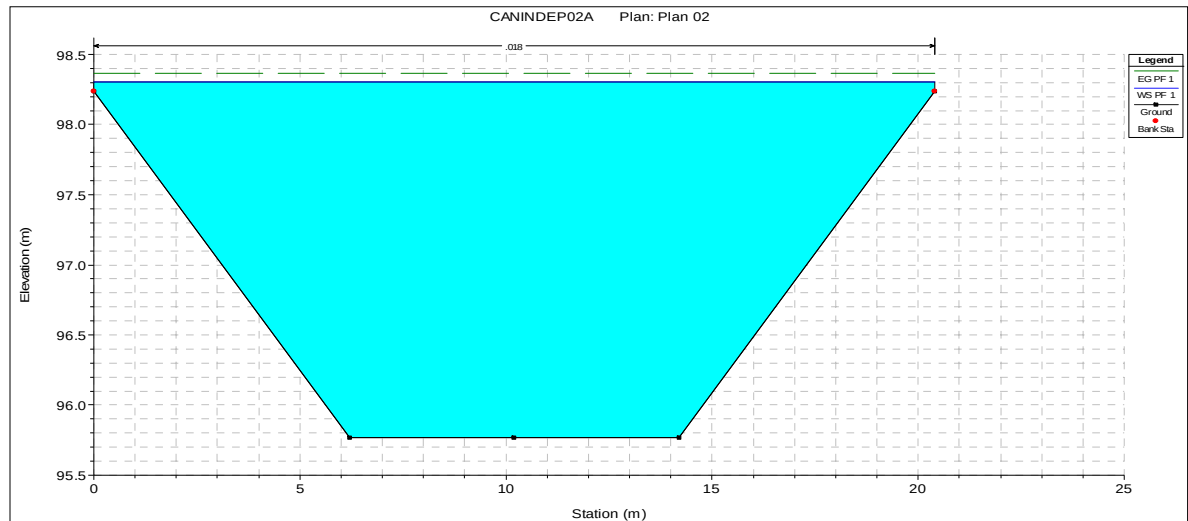


Figura 4.32. Nivel de agua para el Canal Independencia en Concreto Hidráulico del Km 4+420 al 8+560 para Gasto de 40 m³/s de Operación.

Fuente: Este estudio.

Conclusiones.

Los gastos que se presentaron en el Canal Independencia en el ciclo 2008-2009, ninguno alcanzo el caudal máximo de diseño y su comportamiento se rige por la dinámica de la agricultura regional y la Ciudad de Mexicali. Este canal la mayor parte del tiempo se alimenta del bocatoma Sur y solo cuando hay excedentes de agua se utiliza el bocatoma Norte.

Los resultados obtenidos en las corridas nos indican que la velocidad que lleva el agua en este canal es baja, lo cual se debe a lo plano del terreno y esto provoca problemas como el azolve en algunos de las secciones del canal. El azolvamiento

provoca que se eleven los tirantes de operación, trayendo consigo errores en las lecturas de medición debido a que el modo de operar es con tirante aguas arriba y abajo.

La superficie de área expuesta a evaporación e infiltración es mayor en los primeros 27 km del canal, uno de los factores importantes en el mecanismo de la evaporación es la velocidad del viento y la humedad relativa, de presentarse altas velocidades de viento con baja humedad relativa combinándose con temperaturas máximas, se presentó más rápida la evaporación, ya que el aire del ambiente no está saturado de vapor de agua.

Una de las causas por las que se presenta mayor infiltración en el concreto hidráulico, se debe a la separación de sus juntas y a la permeabilidad del terreno. La infiltración al igual que la evaporación dependió del caudal conducido debido a que incrementa el área de la superficie expuesta en las paredes del canal.

Es importante aclarar que la cota topográfica del Canal Independencia inicia en los 36 msnm y finaliza en los 11 msnm, porque el levantamiento topográfico se realizó con una cota arbitraria al no contar con bancos de nivel para realizar el levantamiento.

Este capítulo proporciono los elementos para elaborar un análisis más detallado y genero información que permitirá hacer un análisis final.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Diagnóstico del Canal Independencia.

Los resultados obtenidos en las pérdidas de agua en el Canal Independencia, permiten integrar el siguiente esquema, el cual nos muestra las variables que regulan la eficiencia de conducción de esta obra.

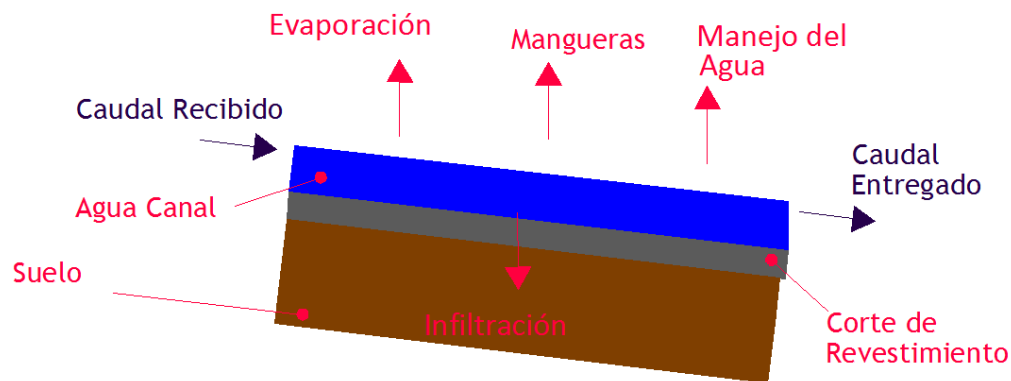


Figura 5.1. Variables que intervienen en la conducción de agua en canales abiertos.

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas.

Las pérdidas que tiene este sistema se clasificaron en dos, pérdidas naturales y estas son atribuibles a los componentes del ciclo hidrológico y técnicas que se producen por factores como medición, manejo del agua, fugas, etc.

De acuerdo a los volúmenes manejados en el ciclo agrícola 2008-2009 para la primera unidad de riego, la cual tiene a su cargo el Canal Independencia manejo un volumen anual de 531 millones de metros cúbicos de los cuales entrego para usos urbano y agrícola la cantidad de 463 millones de metros cúbicos y tuvieron una eficiencia de conducción del 87%, esto significa que 67 millones de metros cúbicos no fueron aprovechados ya sea en el proceso productivo de la zona o en el uso

urbano de la Ciudad de Mexicali, durante el periodo de tiempo que comprende esta evaluación como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Volúmenes manejados en el ciclo agrícola 2008-2009.

Mes	Gasto Recibido (m ³ /mes)	Gasto Entr. Modulo (m ³ /mes)	Perdidas Sistema (m ³ /mes)	Eficiencia Sistema (%)
Octubre	25,480,224	20,928,154	4,552,070	82.13
Noviembre	34,619,962	29,107,814	5,512,147	83.86
Diciembre	30,366,922	25,623,907	4,743,014	84.15
Enero	39,676,349	34,700,400	4,975,949	87.14
Febrero	54,598,147	48,796,042	5,802,106	89.45
Marzo	65,991,888	58,928,429	7,063,459	89.29
Abril	63,150,106	55,848,960	7,301,146	88.41
Mayo	46,068,998	39,942,720	6,126,278	86.65
Junio	52,380,691	45,434,045	6,946,646	86.76
Julio	54,477,792	49,321,786	5,156,006	90.54
Agosto	36,654,854	32,117,904	4,536,950	87.69
Septiembre	27,749,261	22,987,670	4,761,590	82.86
Total Año=	531,215,194	463,737,830	67,477,363	87

Fuente: Este estudio con datos proporcionados por la primera unidad de riego.

En base a lo anterior se determinaron las pérdidas naturales y las pérdidas técnicas con el fin de conocer que cantidad de agua se pudiera rescatar.

Pérdidas Naturales.

Las pérdidas de agua en canales abiertos desde el enfoque hidrológico se deben a dos fenómenos que se presentan en la conducción del agua, infiltración y evaporación. En zonas desérticas dadas sus condiciones climatológicas se presentan altas temperaturas y muy pocas precipitaciones en el transcurso del año, por lo tanto la tasa de evaporación de superficies de agua expuestas se considera mucho mayor.

Pérdidas por Evaporación.

La evaporación mensual calculada para la zona, nos indica que en el mes de Julio es en el que se presenta la mayor cantidad de evaporación con 314.7 mm/día y la mínima se presenta en el mes de Diciembre con 79.1 mm/día, así como una evaporación anual de 2,503 mm/año, lo cual es normal para las características de esta zona basándonos en los registros medidos de la estación climatológica en el poblado de Bataques de 1970 al 2000, las cuales han registrado en promedio una evaporación anual de 2,394 mm/año .

Con lo mencionado anteriormente se establece una relación de evaporación y caudal de operación del Canal Independencia en la cual, el resultado obtenido en este trabajo nos indica que obtenemos un valor mínimo de evaporación en relación al volumen anual conducido por este sistema, tal y como se muestra en la Tabla x.x, en donde se ve que las mayores pérdidas por evaporación se presentan del Km 0+000 al 26+760 con el 1.66% y el 1.27% del Km 26+955 al 56+623, esto significa que por evaporación tendremos una pérdida del 2.92% durante el ciclo agrícola.

Tabla 5.2. Relación evaporación-gasto recibido de agua.

Mes	Gasto Recibido (m ³ /mes)	Gasto Entr. Modulo (m ³ /mes)	Perdidas Sistema (m ³ /mes)	Eficiencia Sistema (%)	Evaporación Asfalto (m ³ /mes)	Evaporación Concreto (m ³ /mes)	Evaporación Canal (m ³ /mes)	Cantidad Evaporada en el Canal (%)
Octubre	25,480,224	20,928,154	4,552,070	82.13	79,708	61,009	140,716	0.55
Noviembre	34,619,962	29,107,814	5,512,147	83.86	51,080	39,097	90,177	0.35
Diciembre	30,366,922	25,623,907	4,743,014	84.15	34,065	26,074	60,139	0.24
Enero	39,676,349	34,700,400	4,975,949	87.14	50,470	38,630	89,099	0.35
Febrero	54,598,147	48,796,042	5,802,106	89.45	51,787	39,638	91,426	0.36
Marzo	65,991,888	58,928,429	7,063,459	89.29	86,275	66,035	152,310	0.60
Abril	63,150,106	55,848,960	7,301,146	88.41	108,528	83,068	191,596	0.75
Mayo	46,068,998	39,942,720	6,126,278	86.65	134,655	103,065	237,720	0.93
Junio	52,380,691	45,434,045	6,946,646	86.76	133,071	101,853	234,924	0.92
Julio	54,477,792	49,321,786	5,156,006	90.54	141,500	108,305	249,806	0.98
Agosto	36,654,854	32,117,904	4,536,950	87.69	131,958	101,002	232,960	0.91
Septiembre	27,749,261	22,987,670	4,761,590	82.86	114,378	87,546	201,924	0.79
Total Año=	531,215,194	463,737,830	67,477,363	87	1,117,475	855,322	1,972,796	2.92%

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la primera unidad de riego.

Pérdidas por Infiltración.

Aunque las pérdidas por evaporación son mínimas, este canal presenta actualmente fisuras en los taludes del canal y la cantidad de evaporación obtenida en este trabajo nos indica que obtenemos un valor pequeño en relación al volumen anual conducido por este sistema, lo cual nos conduciría a que las pérdidas mayores se presentarían en el fenómeno de infiltración.

Las pérdidas por infiltración se producen principalmente en los cauces naturales de las corrientes y en los canales no revestidos; sin embargo, en algunos casos de revestimientos agrietados o con mampostería en mal estado, también pueden ser de mucha importancia. El monto de estas pérdidas es variable, destacando el caso de los canales no revestidos, contruidos en suelos permeables, donde pueden ser de mucha consideración (Palacios 1991).

Debido a que ya cumplió su tiempo de vida útil este canal y también la falta de mantenimiento, actualmente presenta problemas de agrietamientos ya sea de manera total o parcial, tal como se muestra en las Figuras 5.2 a la 5.3, no trayendo solo con esto problemas de infiltración, sino que también al aumentar el fisuramiento de manera superficial, se incrementa el coeficiente de rugosidad provocando con esto una disminución en la velocidad del caudal que circula.



Figura 5.2. Grietas en los taludes del Canal Independencia en km 20+210.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.3. Grietas en los taludes del Canal Independencia en km 37+993.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la evaporación se establece una relación de infiltración y caudal de operación del Canal Independencia, considerando como primera condición que las paredes del área de flujo se encuentran en buen estado y la segunda condición es con fisuras, los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3. Relación infiltración-gasto recibido de agua.

Concreto Asfáltico (Año 1)					
Gasto	(m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño	40.7	339	34	186	0.003%
Max. Oper	27.8	250	25	137	0.002%
Prom. Oper	16	161	16	89	0.002%
Min. Oper	4	59	6	32	0.001%
Concreto Hidráulico (Año 1)					
Gasto	Gasto (m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño	Máximo	2,253,594	1,126,797	1,690,196	30.06%
Prom. Oper	Promedio	1,617,589	808,794	1,213,192	21.58%
Min. Oper	6	981,583	490,792	736,188	13.09%
Total Infiltración		Ambos Materiales (Año 1)			
Gasto		Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño		2,253,933	1,126,831	1,690,382	30.06%
Max. Oper		1,617,839	808,819	1,213,329	21.58%
Prom. Oper		1,617,750	808,811	1,213,280	21.58%
Min. Oper		981,642	490,798	736,220	13.09%

Fuente: Este estudio.

En esta condición podemos ver que si el canal operara a su capacidad máxima aproximadamente el 30% del agua se infiltraría como máximo y esto depende en gran medida sobre el tipo de suelo sobre el cual fue construido.

Tabla 5.4. Relación infiltración-gasto recibido de agua.

Concreto Asfáltico (Año 30)					
Gasto	(m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño	40.7	542	339	440	0.008%
Max. Oper	27.8	400	250	325	0.006%
Prom. Oper	16.0	258	161	210	0.004%
Min. Oper	4.2	94	59	76	0.001%
Concreto Hidráulico (Año 30)					
Gasto	Gasto (m ³ /s)	Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño	Máximo	2,458,466	1,802,875	2,130,671	37.89%
Prom. Oper	Promedio	1,764,642	1,294,071	1,529,357	27.20%
Min. Oper	6	1,070,818	785,267	928,043	16.50%
Ambos Materiales (Año 30)					
Gasto		Máxima (m ³ /mes)	Mínima (m ³ /mes)	Promedio (m ³ /mes)	Cantidad Infiltrada (%)
Diseño		2,459,008	1,803,214	2,131,111	37.90%
Max. Oper		1,765,042	1,294,321	1,529,682	27.20%
Prom. Oper		1,176,686	862,875	1,019,781	18.14%
Min. Oper		1,070,912	785,325	928,119	16.51%

Fuente: Este estudio.

Para la segunda condición podemos ver que si el canal operara a su capacidad máxima aproximadamente el 37% del agua se infiltraría como máximo y al igual esto dependería en gran medida sobre el tipo de suelo sobre el cual fue construido.

Pérdidas Técnicas.

Una vez determinadas las perdidas naturales estamos preparados para estimar el volumen de agua restante, que se debe a la conexión de mangueras y al manejo del agua, ya que estos factores dependen a causas no atribuibles al sistema, ofreciendo con esto la oportunidad de rescatar volúmenes de agua Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Pérdidas Técnicas.

Mes	Perdidas Sistema (m³/mes)	Infiltración Asfalto (m³/mes)	Infiltración Concreto (m³/mes)	Evaporación Asfalto (m³/mes)	Evaporación Concreto (m³/mes)	Tomas Clandestinas (m³/mes)		Manejo en el Agua (m³/mes)	
Octubre	4,552,070	356.34	1,724,838.72	79,708	61,009	22.32		2,686,137	
Noviembre	5,512,147	431.50	2,088,624.32	51,080	39,097	22.32		3,332,892	
Diciembre	4,743,014	371.29	1,797,189.89	34,065	26,074	22.32		2,885,292	
Enero	4,975,949	389.52	1,885,451.76	50,470	38,630	22.32		3,000,986	
Febrero	5,802,106	454.20	2,198,493.33	51,787	39,638	22.32		3,511,710	
Marzo	7,063,459	552.94	2,676,436.62	86,275	66,035	22.32		4,234,138	
Abril	7,301,146	571.54	2,766,499.09	108,528	83,068	22.32		4,342,457	
Mayo	6,126,278	479.57	2,321,326.62	134,655	103,065	22.32		3,566,730	
Junio	6,946,646	543.79	2,632,174.73	133,071	101,853	22.32		4,078,981	
Julio	5,156,006	403.62	1,953,677.93	141,500	108,305	22.32		2,952,097	
Agosto	4,536,950	355.16	1,719,109.56	131,958	101,002	22.32		2,584,503	
Septiembre	4,761,590	372.74	1,804,228.58	114,378	87,546	22.32		2,755,043	
Total Año=	67,477,363	5,282.23	25,568,051.16	1,117,475	855,322	267.84		39,930,965	
Total Año=	67,477,363	Infiltración	25,573,333	Evaporación	1,972,796	Tomas Cland.	267.84	Manejo	39,930,965
Porcentaje de Pérdidas	100.00%	Infiltración	37.90%	Evaporación	2.92%	Tomas Cland.	0.00040%	Manejo	59.18%

Fuente: Este estudio.

En base a la Tabla 5.5, se determinaron que las pérdidas técnicas y comerciales que se presentan principalmente son: 1) manejo del agua en un 60%, 2) la infiltración en un 38% y 3) evaporación así como tomas clandestinas en un 3%.

De las cuales el manejo del agua se podría mitigar si se elabora la debida coordinación entre los organismos operadores de agua y los usuarios que dependen de ellos.

Rescate de Volúmenes de Agua.

De realizarse obras de rehabilitación en el Canal Independencia se estima que se podría recuperar un volumen aprovechable de 45 millones de metros cúbicos al año, lo que equivaldría a la mitad del agua para uso urbano en un año para la Ciudad de Mexicali o también sería igual al volumen utilizado por el modulo seis durante un ciclo agrícola el cual posee una superficie de más de 5,000 hectáreas, en la Tabla 5.6 se elabora un comparativo del estado actual de operación sin proyecto y en la Tabla 5.7 se propone la operación del canal en caso de realizarse proyecto.

Tabla 5.6. Operación actual del Canal Independencia.

Mes	Gasto Recibido (m³/mes)	Gasto Entr. Modulo (m³/mes)	Perdidas Sistema (m³/mes)	Eficiencia Sistema (%)
Octubre	25,480,224	20,928,154	4,552,070	82.13
Noviembre	34,619,962	29,107,814	5,512,147	83.86
Diciembre	30,366,922	25,623,907	4,743,014	84.15
Enero	39,676,349	34,700,400	4,975,949	87.14
Febrero	54,598,147	48,796,042	5,802,106	89.45
Marzo	65,991,888	58,928,429	7,063,459	89.29
Abril	63,150,106	55,848,960	7,301,146	88.41
Mayo	46,068,998	39,942,720	6,126,278	86.65
Junio	52,380,691	45,434,045	6,946,646	86.76
Julio	54,477,792	49,321,786	5,156,006	90.54
Agosto	36,654,854	32,117,904	4,536,950	87.69
Septiembre	27,749,261	22,987,670	4,761,590	82.86
Total Año=	531,215,194	463,737,830	67,477,363	87

Fuente: Este estudio.

Tabla 5.7. Operación en caso de rehabilitación del Canal Independencia.

Mes	Gasto Recibido (m³/mes)	Gasto Entr. Modulo (m³/mes)	Perdidas Sistema (m³/mes)	Eficiencia Sistema (%)
Octubre	25,480,224	23,971,096	1,509,128	94.08
Noviembre	34,619,962	32,872,760	1,747,201	94.95
Diciembre	30,366,922	28,880,970	1,485,952	95.11
Enero	39,676,349	38,091,414	1,584,935	96.01
Febrero	54,598,147	52,762,532	1,835,615	96.64
Marzo	65,991,888	63,716,210	2,275,678	96.55
Abril	63,150,106	60,763,690	2,386,416	96.22
Mayo	46,068,998	43,989,639	2,079,360	95.49
Junio	52,380,691	50,057,514	2,323,177	95.56
Julio	54,477,792	52,678,023	1,799,769	96.70
Agosto	36,654,854	35,058,027	1,596,827	95.64
Septiembre	27,749,261	26,115,940	1,633,320	94.11
Total Año=	531,215,194	508,957,814	22,257,380	96

Fuente: Este estudio.

Para tener una idea general del Costo-Beneficio y tomando como referencia las tarifas de consumo de la CESPM a Enero del 2010 así como los costos de obra establecidos por CONAGUA se estima que sería posible realizar una inversión económica para la rehabilitación del Canal Independencia tal como se muestra de la Tabla 5.8 a la 5.11

Tabla 5.8. Pérdidas anuales del Canal Independencia.

Pérdidas				
m³/año	m³/mes	m³/día	m³/h	m³/s
67,477,363.20	5,623,114	187,437	7,809.88	2.17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.9. Volumen de recuperación anual del Canal Independencia.

Volumen posible de recuperación				
m³/año	m³/mes	m³/día	m³/h	m³/s
45,219,983.65	3,768,332	125,611	5,233.79	1.45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.10 Ingresos por venta de agua de recuperación anual del Canal Independencia.

INGRESOS POR CONCEPTO DE AGUA CESPM					
Concepto	Unidad		Costo Unitario (pesos)	Cantidad Requerida millones m³/año	Importe (pesos)
Agua Domestica	1,000,000	m³	14,969,464	67.48	1,010,099,971
No Domestica	1,000,000	m³	37,215,538	67.48	2,511,206,374
Agua Domestica	1,000,000	m³	14,969,464	45.22	676,918,926
No Domestica	1,000,000	m³	37,215,538	45.22	1,682,886,020

Fuente: Elaboración propia con tarifas de CESPM a Enero del 2010.

Tabla 5.11. Costos preliminares de la realización del proyecto.

COSTOS DE OBRA POR CONCEPTO				
Concepto	Unidad	Costo Unitario (pesos)	Cantidad Requerida	Importe (pesos)
Revestimiento de canales	km	11,256,561	57	641,623,977
Entubamiento de canales	km	14,503,614	57	826,705,998

Fuente: Elaboración propia con costos de CONAGUA a Septiembre del 2009.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

En base al análisis realizado, se determinó que las pérdidas que se presentaron en la conducción de agua del Canal Independencia, durante el ciclo agrícola 2008-2009, fueron las siguientes: por evaporación e infiltración son el 39%, por el manejo del agua el 60% y las perdidas por tomas clandestinas menos del 1% considerando el máximo caudal con el cual operaría esta infraestructura, con una incertidumbre baja en la caracterización de los fenómenos naturales presentes para el caso de evaporación e infiltración.

Para la determinación de la infiltración en este proyecto, se realizó basado en los principios de la Ley de Darcy y en los resultados obtenidos en estanques de prueba, estudio que fue realizado como anteproyecto para la construcción del Canal Independencia antes de 1971 y con materiales de construcción para esa época.

Para la cuantificación de las perdidas por el fenómeno de evaporación, se elabora el cálculo utilizando la metodología de Penman, concluyendo que a pesar de que se requiere de una gran cantidad de operaciones matemáticas, vale la pena realizar la inversión de tiempo en la elaboración de una hoja de cálculo, la cual se puede realizar fácilmente en Excel y no requiere de una programación compleja, ya que se obtienen muy buenos resultados.

Otra propiedad física que determina el comportamiento de operación del canal es la rugosidad y esta se ve directamente asociada al material de construcción y a su estado de conservación. Así por ejemplo un canal de concreto viejo es más rugoso que uno de concreto o asfalto nuevo.

La simulación hidráulica nos permitió evaluar de una manera más rápida y precisa el comportamiento de operación del Canal Independencia, y en base esto permite detectar las zonas que presentan problemas en cuanto a funcionamiento hidráulico y tomar decisiones estratégicamente, sin embargo la metodología para procesar la información que se colectó en campo mediante un levantamiento topográfico, requirió del conocimiento y manejo adecuado de Sistemas de Información Geográfica, programas de dibujo de Ingeniería y tener una base muy sólida en los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, la cual se aplica a cualquier tipo de obra hidráulica. También es importante mencionar que fueron necesarios recursos adicionales tales como equipo topográfico, vehículos, recurso humano especializado.

Uno de los puntos muy importantes en la conducción del agua, fue la cantidad perdida por el manejo del agua, y se le pueden atribuir varios factores, tales como falta de programación de los riegos, pérdidas por fugas en las estructuras, errores de medición al entregar agua a los módulos, cambio de cultivos una vez realizado el plan de riego y otras variables que no se abarcaron en este estudio, y que de las cuales no se contó con la información necesaria, que permitiera estimar en que cantidad le correspondería a cada una de ellas.

En cambio se determinó que la relación existente entre la evaporación que se presenta en el Canal Independencia y su agua recibida no es directa, ya que para el mes diciembre se da la mínima evaporación de agua en un volumen de 60,139 metros cúbicos mensuales, mientras que el consumo mínimo de agua para esta infraestructura se presentó en el mes de Octubre con volumen de 25.4 millones de metros cúbicos mensuales.

Los fenómenos de evaporación e infiltración tienen dos factores muy importantes desde el punto de vista operacional que son el caudal de operación y la distancia de la fuente de abastecimiento.

El caudal de operación depende totalmente de la demanda que le sea requerida por los usos urbanos y agrícolas, en cambio la distancia de la fuente de abastecimiento depende totalmente de la ubicación del recurso hídrico, he aquí la razón de porque el Canal Independencia tiene una gran longitud.

Al presentarse un mayor caudal de operación elevamos el tirante o altura del agua en el canal y mayor es la superficie que está expuesta a la infiltración así como a la evaporación.

Es importante mencionar esto ya que debido al crecimiento acelerado de las ciudades, se requiere un mayor volumen de agua para satisfacer la demanda urbana y esto trae consigo un mayor caudal de operación, por no disponer con fuentes de abastecimiento cercanas, a causa de esto es necesario utilizar este tipo de infraestructuras tal como lo hace la Ciudad de Mexicali, y el Condado de San Diego en Estados Unidos utilizando el Canal Todo Americano.

También por otra parte están los usos agrícolas que tiene el agua del D.R. 014 Rio Colorado, el cual es uno de los más grandes que existen en el país, y que se está viendo amenazado en la disposición de este recurso debido al crecimiento de las ciudades, ya que los organismos operadores de agua del estado, utilizan los canales para abastecerse y si agregamos la falta de inversión en la infraestructura de red mayor la cual ya cumplió su vida útil, estos canales se verán imposibilitados de operar a su caudal máximo de diseño.

Para finalizar el volumen anual de agua que maneja este canal equivale a dos veces el consumo actual de las ciudades de Mexicali, Tecate y Tijuana es decir este canal usa el 32.3% del agua superficial que llega por el Tratado Internacional de Aguas entre México y Estados Unidos de América.

Recomendaciones.

- 1.- Elaborar un estudio de las pérdidas por el manejo del agua, ya que no se conoce en que magnitud impacta cada una de ellas, y esto se debe a que no pertenecen a los fenómenos de evaporación e infiltración.
- 2.- Elaborar un diagnóstico del Canal Reforma que opera la segunda unidad de riego y el Canal Revolución que opera la tercera unidad de riego, ya que en este trabajo solo se caracterizó el Canal Independencia el cual lo opera la primera unidad de riego. Esto con el fin de generar estrategias para la redistribución del agua entre usos agrícolas y urbanos.
- 3.- Desarrollar software de aplicación que nos permita calcular la cantidad potencial de agua que se evapora, en la conducción de agua en canales abiertos, para aplicarlo desde red mayor a red interparcelaria.
- 4.- Caracterizar coeficientes de evaporación que estén relacionados con el caudal de operación en cada canal, para poder llevar un mejor control de las pérdidas debidas por este fenómeno.
5. - Se recomienda volver a realizar un estudio para evaluar las perdidas por infiltración en estanques de prueba utilizando materiales de construcción actuales así como buscar materiales alternos para rehabilitar canales deteriorados y repararlos aun estando en operación.

Unidades y factores de conversión

Volumen

1 metro cúbico	1,000 litros
1 metro cúbico	35.31467 pies cúbicos
1 acre-foot (base on U.S. Survey foot)	1,233.489 metro cúbico
1 galón	3.785412 litros

Equivalencias caudales.

1 m ³ /s	1,000 l/s
1 m ³ /s	86,4000 m ³ /día
1 ft ³ /s	2,446.576 m ³ /día

Distancia.

1 km	1,000 m
1 milla	1,609.344 m
1 ft ³ /s	2,446.576 m ³ /día

Área.

1 ha	1,000 m ²
1 acre	4,046.873 m
1 m ²	10.76391 ft ²

Múltiplos

kilo: (k),	(10^3)	1,000
Mega: (M),	(10^6)	1,000,000
Giga: (G),	(10^9)	1,000,000,000
Tera: (T)	(10^{12})	1,000,000,000,000

BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio Mijares. Fundamentos de Hidrología. Ed, Limusa 1992.
2. ArcGIS Desktop Help.
Disponibile en:<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2>
3. CEA (2008). Escenario del agua en el estado de Sonora y Oportunidades para Investigación. Comisión Estatal del Agua, Phoenix, Az. Febrero 21 de 2008. Disponible en:
<http://www.azwaterinstitute.org/media/Binational/Ulloa%20presentation.pdf>
4. Comisión Nacional del Agua. Asignación de Volúmenes para el año Agrícola 2006-2007. Gerencia Regional de la Península de Baja California, Sub Gerencia Regional de Infraestructura Hidroagrícola, Distrito de Riego 014, Río Colorado, Jefatura de Operación, Departamento de Estadística Agrícola.
5. CONAGUA (2008). Estadísticas del Agua en México 2008
ISBN 978-968-817-895-9, 1a. edición, Comisión Nacional del Agua.
Disponibile en: www.conagua.gob.mx
6. CONAGUA (2007). Proyecto de Modernización y Rehabilitación del Distrito de Riego 014, Río Colorado, Baja California y Sonora. Disponible en:
<http://www.conagua.gob.mx/>
7. Custodio- Llamas. Hidrología Subterránea. Ed, Omega 1983.

8. Datos Climatológicos. Proyecto de Bases de Datos Climatológicos.

Disponible en:

<http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/introduccion.html>.

9. Datos Climatológicos. Sistema de Información del Manejo de Agua de Riego en Baja California. Disponible en: <http://www.sfa.gob.mx/simarbc/index.htm>

10. Diouf Jacques. (2007). Afrontar la escasez de agua: Entrevista con el Director General de la FAO. Disponible en:

<http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2007/1000521/index.html>

11. Enrique Mejía Sáenz/Enrique Palacios Vélez/Adolfo Exebio García/Ana Laura Santos Hernández (2002). Problemas Operativos en el Manejo del Agua en Distritos de Riego -2002, Universidad Autónoma Chapingo. Disponible en: www.chapingo.mx/terra/contenido/20/2/art217-225.pdf

12. FAO (2007). La FAO pide actuar con urgencia para afrontar la creciente escasez de agua es necesario mejorar las prácticas agrícolas. Disponible en: <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2007/1000520/index.html>

13. Frank M. White. Fluid Mechanics. Ed, McGraw-Hill, Cuarta Edición.

14. Hec-GeoRas Documentación.

Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas.html>

15. Hec-Ras Documentación.

Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-document.html>

16. Hidrométricos. Distrito de Riego, Rio Colorado S. De R.L. de I. P.,
Departamento de operación, primera unidad de riego.

17. Instituto de Ciencias Agrícolas, UABC (2008). Plan rector del desarrollo
económico del Valle de Mexicali, Baja California.

18. Hernández Sampieri, Roberto. Fundamentos de metodología de la
investigación, Editorial McGraw-Hill

19. J. Ramírez, J. Argueta, E. Peña, V. Ruiz y E. Olvera (2002). Avances y
perspectivas de la medición del agua en canales, Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua. Disponible en:
<http://www.imta.gob.mx/instituto/historial-proyectos/rd-muestras-2002.html>

20. Lara García Baudelio. El Protocolo de Investigación: Guía para su
elaboración México, Editorial de la Universidad de Guadalajara, 1991.

21. Mark W. Rosegrant, Ximing Cai, Sarah A. Cline. (Septiembre de 2002).
Panorama global del agua hasta el año 2025. Disponible en:
www.ifpri.org/spanish/pubs/fpr/pr14sp.pdf

22. Mott. L. Robert (2006). Mecánica de Fluidos. Sexta edición, Pearson Education, México, 2006
23. Osuna Millan José Guadalupe (2008). Mensaje del Gobernador de Baja California, en su Primer Informe de Labores. Disponible en: http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/gobierno/gobernador/discursos/1informe_labores.jsp
24. Palacios Vélez Enrique. (1979). Manual de Operación de Distritos de Riego. Segunda Edición. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
25. Román C, Araiza Z, Escobosa García, Escoto Valdivia (2005). Evaluación de Canales de Riego bajo tres condiciones de operación en Valle de Mexicali.
26. V. Ruiz, J. Navarro, M. Paredes, B. Andrade, J. Anguiano, F. Delgado y J. Ramírez (2005). Medición y operación remota en el distrito de riego 014 Río Colorado, Baja California y Sonora, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en: <http://www.imta.gob.mx/instituto/historial-proyectos/rd-muestras-2005.html>
27. Ven T. Chow. (1994). Hidrología aplicada. Traducido de la primera edición en ingles de Applied Hydrology por McGraw-Hill, Inc.
28. Ven T. Chow. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Traducido de la edición en ingles de Open-Channel Hydraulics por McGraw-Hill, Inc.